



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

선형 시-불변 시스템을 이용한 선체운동 전달모델
모델링에 관한 연구

A Study on the modelling of ship motion transfer model using Linear
Time Invariant system

지도교수 임 정 빈

2019 년 08 월

한국해양대학교 대학원

항해학과

송 재 영

본 논문을 송재영의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 김 세 원



위 원 이 춘 기



위 원 임 정 빈



2019년 08월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	viii
1. 서 론	
1.1 연구의 목적	1
1.2 연구의 배경	1
1.3 선행연구 고찰	2
1.4 연구의 범위와 절차	4
2. 연구 방법	
2.1 선체운동전달 모델	7
2.2 모델의 전달함수 추정 방법	10
2.2.1 전달함수 추정 절차	10
2.2.2 시스템 식별을 위한 입력신호 결정	12
2.2.3 시스템 식별을 위한 출력신호 결정	14
2.2.4 전달함수 추정 방법	28
3. 실험 및 결과	
3.1 실험 데이터 획득 결과	30
3.2 전달함수 추정 결과	32
3.2.1 전달함수의 계수 추정 결과	32
3.2.2 전달함수의 극-영점 분석 결과	34
3.2.3 전달함수의 파워스펙트럼 분석 결과	39
3.2.4 차원에 따른 전달함수 추정결과의 비교	40
3.3 모델에서 추정한 물 운동 분석 결과	41
4. 결 론	

참고문헌	46
------------	----

List of Tables

Table 1 Data for calculation of wave	14
Table 2 Ship' s kinematic mode	16
Table 3 Particular of model ship	17
Table 4 Loading condition of model ship	17
Table 5 Mesh information of fluid domain	25
Table 6 Coefficient of transfer function $H_1(z)$	33
Table 7 Coefficient of transfer function $H_2(z)$	34
Table 8 Grid of poles and zeros $H_1(z)$	36
Table 9 Grid of poles and zeros $H_2(z)$	38
Table 10 Comparison of experimental case	41
Table 11 Result of experimental	43

List of Figures

Fig. 1 Flow chart of study approach	6
Fig. 2 Conceptual block diagram of a input-output system	7
Fig. 3 Block diagram for the model of ship' s motion transfer proposed in the present study	9
Fig. 4 Shape of linear water surface wave	13
Fig. 5 Fixed ship coordinate system	15
Fig. 6 Drawing of model ship (2D)	18
Fig. 7 Drawing of model ship (3D)	18
Fig. 8 Lines of model ship	19
Fig. 9 CFD Analysis sequence	21
Fig. 10 Fluid domain (Side view)	22
Fig. 11 Fluid domain (Front view)	22
Fig. 12 Fluid domain (Isometric view)	23
Fig. 13 Mesh generation on hull using ICEM CFD (Side view)	23
Fig. 14 Mesh generation on fluid domain using ICEM CFD(Side view without vessel)	24
Fig. 15 Mesh generation using ICEM CFD (Side view)	24
Fig. 16 Mesh generation using ICEM CFD (Aft part side view)	24
Fig. 17 Mesh generation using ICEM CFD (Isometric view)	25
Fig. 18 Opening wall boundary condition which is visualized by ANSYS-CFX (inlet & outlet)	26
Fig. 19 Details of rigid body setting on ANSYS-CFX	27
Fig. 20 Snap shot of System identification tool box	28
Fig. 21 Snap shot of data input window	29
Fig. 22 Snap shot of model setting window	29
Fig. 23 Snap shot of candidate model	29
Fig. 24 Incident wave used as input signal	30

Fig. 25 Ship motion used as output signal which is calculated by ANSYS-CFX	31
Fig. 26 Snap shot of ship's roll motion at time t=100.0sec which is visualized by ANSYS-CFX	32
Fig. 27 Pole - zero plot of $H_1(z)$	35
Fig. 28 Step response of $H_1(z)$	36
Fig. 29 Pole - zero plot of $H_2(z)$	37
Fig. 30 Step response of $H_2(z)$	38
Fig. 31 Power spectrum of estimated transfer function $H_1(z)$	39
Fig. 32 Power spectrum of estimated transfer function $H_2(z)$	40
Fig. 33 Verification between measured and simulated output (High order state space)	42
Fig. 34 Verification between measured and simulated output (Low order state space)	42
Fig. 35 Volume of Fluid model	55
Fig. 36 Snap shot of Ship motion(100.0sec)	56
Fig. 37 Snap shot of Ship motion(100.5sec)	56
Fig. 38 Snap shot of Ship motion(101.0sec)	57
Fig. 39 Snap shot of Ship motion(101.5sec)	57
Fig. 40 Snap shot of Ship motion(102.0sec)	58
Fig. 41 Snap shot of Ship motion(102.5sec)	58
Fig. 42 Snap shot of Ship motion(103.0sec)	59
Fig. 43 Snap shot of Ship motion(103.5sec)	59
Fig. 44 Snap shot of Ship motion(104.0sec)	60
Fig. 45 Snap shot of Ship motion(104.5sec)	60
Fig. 46 Snap shot of Ship motion(105.0sec)	61
Fig. 47 Snap shot of Ship motion(105.5sec)	61
Fig. 48 Snap shot of Ship motion(106.0sec)	62
Fig. 49 Snap shot of Ship motion(106.5sec)	62
Fig. 50 Snap shot of Ship motion(107.0sec)	63
Fig. 51 Snap shot of Ship motion(107.5sec)	63

Fig. 52 Snap shot of Ship motion(108.0sec)	64
Fig. 53 Snap shot of Ship motion(108.5sec)	64
Fig. 54 Snap shot of Ship motion(109.0sec)	65
Fig. 55 Snap shot of Ship motion(109.5sec)	65
Fig. 56 Snap shot of Ship motion(110.0sec)	66
Fig. 57 Snap shot of Ship motion(110.5sec)	66
Fig. 58 Snap shot of Ship motion(111.0sec)	67

<영문초록>

A Study on the modelling of ship motion transfer model using Linear Time Invariant system

Jaeyoung Song

*Department of Navigation Science
Graduate School of Korea Maritime & Ocean University*

Abstract

The estimation of ship motion is a essential element for safety of vessels. Therefore, the assumption of it is bit difficult.

In this study, ‘Ship Motion Transfer’ model has been set up using Linear-Time Invariant(LTI) system which is defined in discrete signal processing area. A roll motion of 153,000m³ class LNG vessel has been secured by applying certain ocean wave using ship motion simulation and applied to ‘Ship Motion Transfer’ model as input/output. Transfer function is represented by the characteristic of ‘Ship Motion Transfer’ model. It has been estimated using state space model which is one of the system identification method. The effectiveness of model and stability of transfer function which is built through comparison of apparent motion in regard to the estimated result, pole-zero interpretation, and frequency reply analysis has been examined.

As a result, the percental of estimation between ship motion characteristic secured through the simulation and another one estimated through the model as 79.5%.

Also, the model's accuracy has been differed by order of state variables.

This study has ended in estimation of transfer fraction of Linear-Time Invariant(LTI) system which is under single input single output(SISO) condition, using vessel's roll motion acquired under certain ocean wave environment. The next study about assumption of system transfer function under multiple input multiple output(MIMO) condition which enables multiple output of six degrees of freedom has been left as another assignment and hoped to be conducted under a ocean wave environment of various conditions.

KEY WORDS: ship motion, system identification, transfer function, pole-zero interpretation, frequency response

<국문초록>

A Study on the modelling of ship motion transfer model using Linear Time Invariant system

Jaeyoung Song

*Department of Navigation Science
Graduate School of Korea Maritime & Ocean University*

Abstract

선체운동의 추정은 선박의 안전에 중요한 요소이다. 하지만 선체운동은 복잡한 환경에서 발생한다. 따라서 그의 추정은 다소 난해하다.

본 연구에서는 이산신호처리(discrete signal processing) 분야에서 정의된 선형 시-불변(Linear Time-Invariant, LTI) 시스템을 이용하여 선체운동전달 모델을 구축하였다. 선체운동 시뮬레이션을 이용해 임의의 해양 파를 입사한 153,000m³급 LNG 선박에 대한 롤(Roll) 운동 값을 확보하여 선체운동전달 모델의 입출력으로 적용하였다. 선체운동전달 모델의 특성은 전달함수로 대표된다. 이를 시스템 식별법의 하나인 상태 공간 모델을 이용하여 추정하였다. 추정한 결과에 대한 시운동(apparent motion) 비교, 극 영점 해석과 주파수 응답 분석을 통해 구현한 전달함수의 안정성과 모델의 유효성을 평가하였다.

평가 결과 시뮬레이션을 통해 획득한 선체운동 특성과 모델을 통해 추정한 선체운동 특성사이의 추정율은 79.5 % 임을 알 수 있었다. 또한 상태 변수의 차원에 따라 모델의 정밀도가 변함을 확인하였다.

본 연구에서는 임의의 해양 파 환경 하에서 획득한 선체의 롤 운동 값을 이용해 단일입력-단일출력 조건하의 선형-시 불변 시스템의 전달함수 추정

에 그치고 말았다. 향후 다양한 조건의 해양 파 환경 하에서 6자유도 운동이 다중출력되는 다중입력-다중출력 조건하의 시스템 전달함수의 추정에 관한 연구를 향후의 과제로 남기고자 한다.

KEY WORDS: 선체운동, 시스템 식별법, 전달함수, 극-영점해석, 주파수 응답

제 1 장 서 론

1.1 연구의 목적

본 연구의 목적은 이산신호처리(discrete signal processing) 분야에서 정의된 선형 시-불변(Linear Time-Invariant, LTI) 시스템을 이용하여 선체운동전달 모델을 구축하는 것이다. 여기서 선체운동은 컴퓨터를 기반으로 특정 선박을 모델링하여 시뮬레이션 하였다.

LTI 시스템이란, 입력(X)과 출력(Y) 그리고 전달함수(H)가 주어진 경우, 이들 사이의 관계를 수치적으로 해석할 수 있는 입·출력 관계를 정의한 것으로, 출력(Y)이 시간에 따른 독립변수에 종속하지 않는 선형시스템이다. 이러한 LTI 시스템은 입력과 출력 그리고 전달함수 사이의 변환 또는 역변환이 가능한 특징이 있다.

선체운동전달 모델은 선체를 단일입력-단일출력 (Single-input single-output, SISO)을 갖는 LTI 시스템으로 가정하여 구축하였다. 이 모델은 입력과 출력 그리고 시스템으로 구성되는데 시스템은 전달함수(H)로 나타낼 수 있다. 전달함수(H)는 모델의 입력(X)과 출력(Y)에 대한 $H = X^{-1}Y$ 의 관계를 통해서 획득하였다.

아울러, 이러한 전달함수(H)를 이용하면 $Y = XH$ 의 관계를 통해서 선체운동특성을 추정할 수 있고, $X = YH^{-1}$ 의 관계를 통해서 해양 파를 추정할 수 있다. 그래서 LTI 시스템을 이용한 모델은 입력과 출력 및 시스템 사이의 관계를 통해서 다양한 해석이 가능한 장점이 있다.

1.2 연구의 배경

선체운동전달 모델을 구축하는 궁극적인 목표는 전달함수의 특성을 이용하여 선체운동을 추정하기 위한 것이다. 이를 위해서는 추정된 선체운동에 대한 체계적인 해석이 가능해야 하고, 추정한 결과에 대한 유효성의 검증이

가능해야 한다. 그래서 본 연구에서는 학계에서 증명되고, 해석과 유효성 검증에 관한 이론과 기법이 개발된 LTI 시스템을 선체운동전달 모델에 적용하고자 한다.

선체운동은 해양 파에 반응한 선체의 동적인 결과를 의미하는 것으로, 일반적으로 6-자유도(6-degree of freedom) 운동으로 정의될 수 있다. 6-자유도 운동은 롤링(rolling), 피칭(pitching), 요잉(yawing), 서지(surge), 스웨이(sway), 히브(heave) 등이다. 이러한 선체운동은 선박의 조종성능과 안전성의 평가에 중요한 요소들로 적용되고 있기 때문에 높은 정밀도로 측정 또는 추정이 중요하다(이승건, 2018).

현재까지 연구 개발된 선체운동 측정 또는 추정 방법은 크게 세 가지로 구분할 수 있는데, 1) 실제 선박에서 측정하는 방법, 2) 수조에서 모형 선박을 이용하여 측정하는 방법, 3) 본 연구의 목적과 같이 선체운동전달 모델을 이용하여 추정하는 방법이다.

위의 1)의 방법은 실제 선박을 이용하기 때문에 가장 정확한 방법이다(송명재 등, 1993). 그러나 이 방법은 위험하고 비용이 많이 들며 많은 시간이 요구되는 문제가 있다. 반면 2)의 방법은 1)의 방법과 비교하여 낮은 위험과 낮은 비용의 장점이 있으나, 실제 해상과 다른 실험환경 때문에 측정결과의 신뢰성에 문제가 발생할 수 있다(대한조선학회 선박유체역학연구회, 2009). 이에 대해서, 3)의 방법은 1)과 2)의 방법과 비교하여 안전하고 간단한 장점이 있으나 모델의 구현이 어려운 문제점이 있다. 이러한 문제점에도 불구하고 3)의 방법을 이용하였는데, 그 이유는 다음과 같은 선행 연구들의 조사를 통한 것이다.

1.3 선행연구 고찰

선체운동의 측정 또는 추정에 관한 선행연구는, 시뮬레이션을 이용한 방법과 모델을 이용하는 방법으로 구분되었다.

먼저, 시뮬레이션을 이용한 방법을 고찰하면 다음과 같다.

허재경 등(2012)은 중첩 격자계를 유체장에 도입하여 파랑 중 선체의

6-자유도 운동을 시뮬레이션을 통해서 해석한 바 있다. 그는 비선형의 선체운동을 모형시험과 비교하여 유의성을 확인하였다.

Hiromichi 등(2012)은 비선형의 파랑 외력에 대한 선체운동 평가 시뮬레이션 기법을 개발하여 파랑 중 선체운동 해석방법을 제안하였다. 실험용 선체 모델로 KCS(Kriso Container Ship) 선형으로 정한 그의 연구 결과 종동요의 경우 모형시험과 1%의 오차로 일치함을 확인하였다.

이희범(2015)은 선박해양플랜트연구소(Korea Research Institute of Ship's and Ocean engineering, KRISO)의 무인활주 선형과 SSRC(Ship Stability Research Center) 크루즈 선형을 이용하여 선체운동을 해석하였다. 시뮬레이션 결과, 제안한 기법이 수치 확산 및 감쇠를 제어하는데 유의미함을 확인하였다.

위와 같이 시뮬레이션을 이용한 기존 연구들은 특정 선형에 대한 선체운동을 시뮬레이션하여 획득한 모델과 기준이 되는 모델의 시운동(apparent motion)만을 비교한 것으로, 추정한 선체운동의 극-영점 분석과 주파수응답 분석을 통한 본질적인 동적모델의 특성 분석과 이에 대한 검증이 부족한 문제가 있다.

다음으로, 모델을 이용한 선체운동 추정 방법에 대한 선행연구를 고찰하면 다음과 같다. 모델을 이용하는 방법은 주로 시스템 식별법(system identification)을 적용하고 있는 것이 특징인데, 시스템 식별법은 선체의 전달함수를 추정하기 위한 것이다.

이태일(2003)은 선박의 조종운동특성에 대한 유체력 미계수를 도출하기 위해서 시스템 식별법을 적용한 바 있다. 연구결과, 시스템 식별법은 실선실험과 비교하여 선형 및 비선형의 유체력 미계수의 동시 획득이 곤란함을 알았다. 그래서 미계수에 대한 경험식만을 제안하였다.

반일환(2015)은 해양 플랫폼(platform)의 계류삭 장력의 예측에 시스템 식별법을 이용한 바 있다. 이 연구에서는, 장력 측정 데이터의 특성을 잡음이 없는 비선형으로 정의하고, 비선형의 입·출력 관계를 이용하여 장력을 예측하고자 하였다. 연구결과, 측정 데이터의 수치 해석 결과와 예측 결과

사이에 유의성이 있음을 확인한 바 있다.

김용균(2016)은 스파플랫폼(Spar platform)의 계류색에 대한 구조 건전성을 진단하고 장력을 예측하기 위하여 시스템 식별법을 적용한 바 있다. 연구결과, 예측한 장력은 실제 물리현상과 유의함을 확인하였다.

위와 같이 모델을 이용한 선체운동 추정에 관한 선행연구에서는 시스템 식별법을 적용하고 있는데, 시스템 식별법을 적용한 결과, 극-영점과 주파수 응답의 분석이 가능하고, 추정된 결과의 검증이 가능함을 나타냈다.

그래서 본 연구에서도 시스템 식별법을 이용하여 모델의 전달함수를 획득한 후, LTI 시스템 기반의 선체운동전달 모델을 구축하고자 한다.

1.4 연구의 범위와 절차

본 연구의 범위는 1) 선체의 운동전달 모델 구현, 2) 모델의 입·출력 관계 설정, 3) 실험 데이터 획득과 분석, 4) 전달함수 획득, 5) 모델의 해석과 유용성 검증 등 다섯 가지로 제한하였다.

1) 선체의 운동전달 모델은 주파수 영역에서 해석한 LTI 시스템을 이용하여 구축하였다. LTI 시스템을 이용하면 모델의 입·출력 사이에 선형성이 담보되는 장점이 있다.

2) 모델의 입력신호는 단일 주파수를 갖는 해양 파로 정하고, 모델의 출력신호는 선체의 운동특성 중에서 단일의 롤(roll) 운동으로 제한하였다. 그래서 모델은 단일입력-단일출력(single-input and single-output, SISO)의 조건으로 제한된다.

3) 실험 데이터는 전산유체역학(Computerized fluid dynamics, CFD) 프로그램을 이용하여 획득하였다. CFD로 시뮬레이션할 선박 모델은 델프트 쉽(Delft-ship marine software) 프로그램을 이용하여 구축하였는데 이 때 적용한 해양 파는 사인 파(Sine wave)를 적용하였다. 그리고 ANSYS-CFX 17.2를 이용하여 모델 선박에 대한 시뮬레이션을 실시하였다.

4) 전달함수는 획득한 실험 데이터를 상용 도구인 MATLAB의 *System Identification Tool Box*의 시스템 식별 프로그램에 적용하여 추정하였다.

5) 구축한 모델의 해석과 유용성 검증은, 추정한 전달함수의 극-영점 (Pole-Zero) 특성과 시간 및 주파수 응답특성을 이용하여 해석하고, 모델에서 추정한 운동과 원래 운동을 비교해서 모델의 유효성을 검증하였다.

Fig. 1은 연구 절차를 나타낸 것으로 다음과 같이 6단계로 구분하였다.

- Step 1: 관련된 이론 및 선행 연구 검토
- Step 2: LTI 시스템 기반의 선체의 운동전달 모델 제안
- Step 3: 선체운동을 정의하는 수학적 이론을 전개
- Step 4: CFD 프로그램을 이용하여 실험 데이터를 획득
- Step 5: 획득한 실험 데이터를 이용하여 모델의 전달함수를 추정
- Step 6: 추정한 전달함수의 유의성을 검증하고, 모델의 유효성을 검토

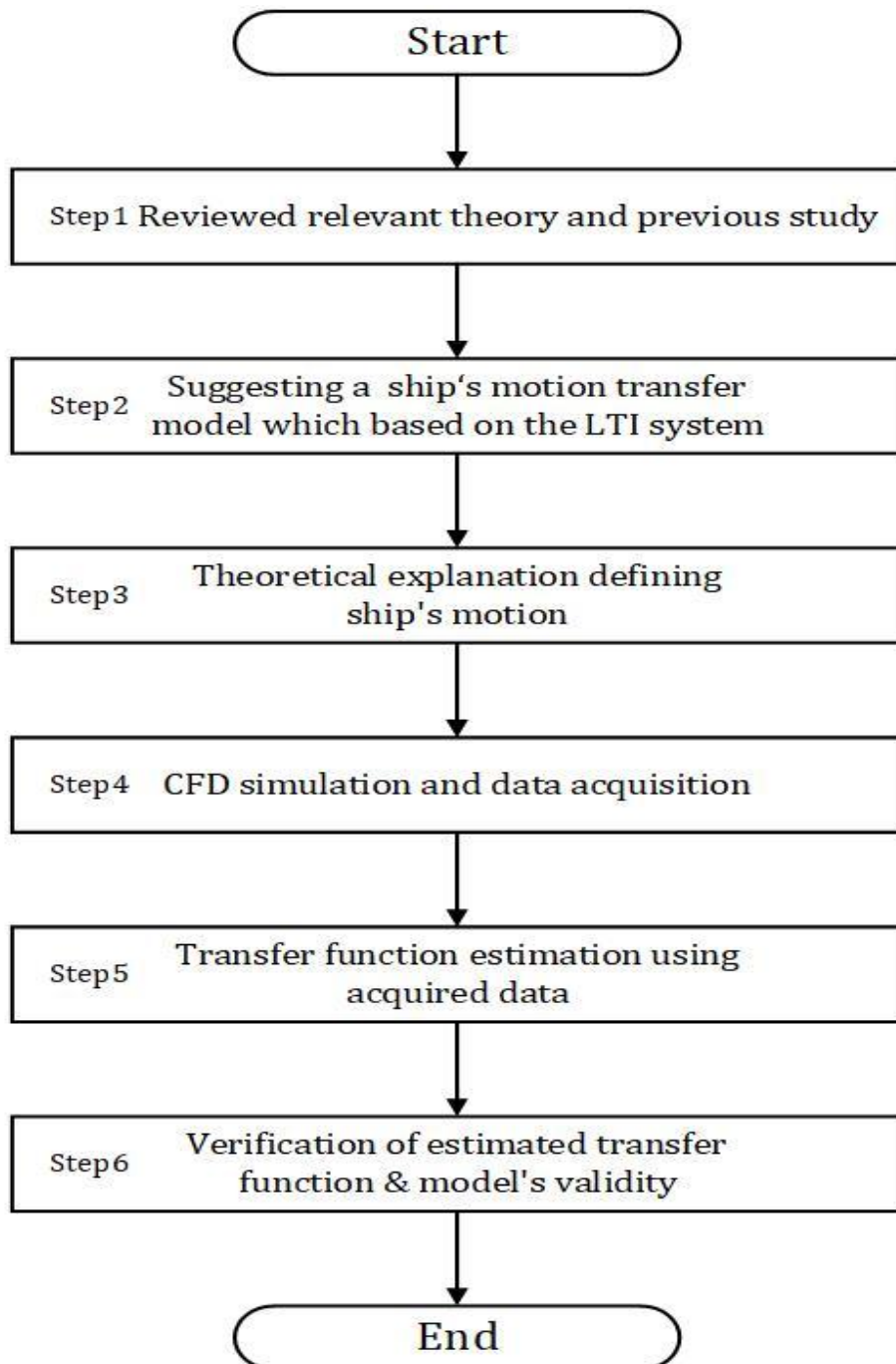


Fig. 1 Flow chart of study approach

제 2 장 연구 방법

2.1 선체운동전달 모델

선체운동전달 모델링에는 이산신호영역에서 정의된 선형 시-불변(Linear Time-invariant, LTI) 시스템을 이용하였다. LTI 시스템은 출력이 시간에 따른 독립변수에 종속하지 않는 선형적인 특징을 갖는 시스템을 의미한다(김성중, 2018).

Fig. 2는 LTI 시스템의 입·출력 관계를 시간영역에서 나타낸 블록선도이다. 입력신호 $x(t)$ 는 물리량의 변화를 갖는 정보로서 한 개 이상의 독립변수를 가진 함수로 정의될 수 있다. 시스템 $h(t)$ 는 입력신호를 처리하여 출력신호 $y(t)$ 를 생성하는 장치를 의미하는 것으로 수학적 방정식으로 표현되는 전달함수로 정의된다.

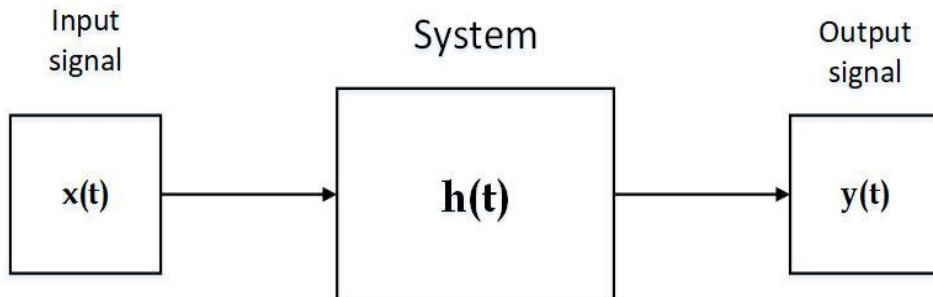


Fig. 2 Conceptual block diagram of a input-output system

Fig. 2에 나타난 입·출력 시스템은 주파수영역과 시간영역으로 구분하여 해석할 수 있는데, 먼저 시간영역에서는 식(2.1)의 입·출력 관계로 나타낼 수 있다.

$$y(t) = x(t) * h(t) \quad (2.1)$$

여기서, $x(t)$ 는 시간 t 에 대한 입력신호, $y(t)$ 는 시간 t 에 대한 출력신호, $h(t)$ 는 시간 t 에 대한 시스템 파라메타이다.

위의 식(2.1)에 나타난 입·출력 시스템은 다음과 같이 해석된다(김성중, 2018). 먼저, $h(t)$ 가 $x(t)$ 의 변화에 종속되면 비선형(non-linear) 시스템으로 정의되고, 이와 달리 $x(t)$ 의 변화에 종속되지 않으면 선형(linear) 시스템으로 정의된다. 아울러 $h(t)$ 가 시간 t 에 종속되면 시-변(time-variant) 시스템으로 정의되고, 이와 달리 시간 t 에 종속되지 않으면 시-불변(time-invariant) 시스템으로 정의된다. 또한, $h(t)$ 의 값이 시간 t 에 종속되고 $x(t)$ 에 종속되지 않으면 선형 시-변(linear time-variant) 시스템으로 정의되고, 이와 달리 $h(t)$ 의 값이 시간 t 에 종속되고 $x(t)$ 에 종속되면 비선형 시-변(non-linear time-variant) 시스템으로 정의된다.

마지막으로, $h(t)$ 의 값이 시간 t 에 종속되지 않고 $x(t)$ 에 종속되면 비선형 시-불변(non-linear time-invariant) 시스템으로 정의되고, 이와 달리 $h(t)$ 의 값이 시간 t 에 종속되지 않고 $x(t)$ 에도 종속되지 않으면 선형 시-불변 시스템(Linear Time-invariant, LTI)으로 정의된다.

위의 식(2.1)과 달리 주파수 영역에서 LTI 시스템의 입·출력 관계는 식(2.2)와 같이 정의될 수 있다.

$$Y(z) = X(z)H(z) \quad (2.2)$$

여기서, z 는 z -영역(domain)으로 변환된 독립변수, $X(z)$ 는 z -영역에서의 입력신호, $Y(z)$ 는 z -영역에서의 출력신호, $H(z)$ 는 z -영역에서의 시스템 전달특성이다.

본 연구에서는 위의 식(2.2)의 주파수 영역에서 정의된 LTI 시스템을 모델 개발에 적용하였다. 주파수 영역에서 정의된 LTI 시스템은 두 가지 주요한 특징을 갖는데, 1) 시스템의 선형 특성을 통해서 예측 가능한 시스템 해석이 가능하고, 2) 시-불변 특성을 통해서 예측 가능한 결과를 획득할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 LTI 시스템의 특징을 활용하여 선체의 운동전달 모델을 구현하였다.

Fig. 3은 본 연구에서 제안한 선체의 운동전달 모델에 대한 입·출력 관계를 나타낸다. 이 모델의 입력은 해양 파 X_{wave} 이고, H_{hull} 는 선체의 운동전달특성이며, 출력은 선체운동 Y_{motion} 이다.

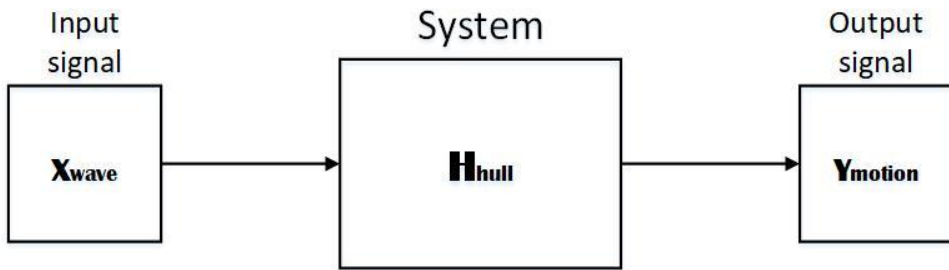


Fig. 3 Block diagram for the model of ship's motion transfer proposed in the present study

Fig. 3에서, 모델의 전달특성 H_{hull} 은 주파수 영역에서 정의되기 때문에 간단한 대수 방정식으로 해석이 가능하다. 예를 들어 설명하면 다음과 같다.

첫째, $H_{hull} = X_{wave}^{-1} Y_{motion}$ 의 관계를 통해서 선체의 운동전달특성을 추정할 수 있다. 아울러 위에서 설명한 LTI 시스템의 두 가지 주요한 특징을 이용하여 추정한 운동전달특성을 주파수 영역에서 평가할 수 있다.

둘째, $Y_{motion} = X_{wave} H_{hull}$ 의 관계를 통해서 선체운동을 추정할 수 있다. 즉,

모델에 해양 파가 입력되면 선체운동 추정이 가능하고, 위에서 설명한 LTI 시스템의 두 가지 주요한 특징을 이용하여 추정한 선체운동을 주파수 영역에서 평가할 수 있다.

셋째, $X_{wave} = Y_{motion} H_{hull}^{-1}$ 의 관계를 통해서 해양 파를 추정할 수 있다. 즉, 모델의 출력에 선체운동이 가해지면 운동전달특성의 역변환 H_{hull}^{-1} 을 이용하여 모델의 입력에서 해양 파를 추정할 수 있다. 아울러 위에서 설명한 LTI 시스템의 두 가지 주요한 특징을 이용하여 추정한 해양 파를 주파수 영역에서 평가할 수 있다.

따라서 본 연구에서 제안한 LTI 시스템 기반의 모델은 다양한 연구 분야에 적용할 수 있다. 이러한 운동전달 모델 구축에 가장 중요한 것은 전달함수이다. 전달함수 추정에 관해서는 아래 2.2 모델의 전달함수 추정 방법에 기술하였다.

2.2 모델의 전달함수 추정 방법

2.2.1 전달함수 추정 절차

모델의 전달함수는 LTI 시스템 식별방법을 이용하여 추정하였다. 이러한 시스템 식별 절차는 LTI 시스템의 입·출력 데이터를 이용한 동적 모델의 수학적 모델을 찾는 문제로 귀결된다. LTI 시스템의 식별절차(Ljung, 1987; Favoreel, W et al, 2000; Van Overschee, P et al, 2012)는 다음의 4단계로 구분하였다.

[1단계: 실험설계]

실험설계 단계에서는 측정할 시스템의 대상, 측정시기, 사용할 신호의 종류 등을 결정하고, 이러한 신호들을 주파수영역에서 해석할 때 필요한 샘플링 주기를 결정한다. 본 연구에서 측정할 시스템은 153,000 m³급 LNG 선박으로 정하였는데, 그 이유는 최근 LNG 선박의 급증으로 다양한 안정성 평가를 위한 수요가 크기 때문이다. 그리고 LTI 시스템에 적용할 입력신호는 충분히 가진된(persistently excited) 신호가 필요한데, 본 연구에서는 진폭 2.75 m, 파장

288 m의 선형 수면파를 사용하였다.

[2단계: 시스템 식별 모델의 선정]

시스템 식별을 위한 모델의 종류는 블랙박스 모델(Black Box Model, BBM), 그레이박스 모델(Grey Box Model, GBM)이 있다. 블랙박스 모델은 시스템의 입·출력 신호를 측정해서 얻은 데이터에 대하여 동적 피팅(fitting)을 통해서 시스템 모델을 추정하기 위한 것으로 차분방정식으로 모델링 결과를 표현한다. 그레이 박스 모델은 인지된 시스템 모델구조에 미지의 모델 파라메타를 시스템 입·출력 데이터에 근거해 추정하는 모델이다.

본 연구에서는 입력 데이터와 출력 데이터를 이용해 선체운동의 특성을 추정하는 것이 목적이므로 블랙박스 모델을 사용하였다. 또한 블랙박스 모델 중 시스템 특성 추정을 위한 모델은 상태 공간 모델로 선정하였다. 여기서 상태 공간 모델은 식(2.3)으로 정의될 수 있다.

$$\begin{aligned}x(t+T_s) &= Ax(t) + Bu(t) + Ke(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + e(t)\end{aligned}\tag{2.3}$$

여기서, T_s 는 이산시간 샘플링 시간, K 는 잡음속성을 결정하는 칼만이득(Kalman gain), A, B, C, D 는 시스템 행렬이다. $x(t), u(t), y(t)$ 는 상태벡터이고, $e(t)$ 는 백색잡음이다.

본 연구에서는 상태 공간 모델을 이용하여 상태변수를 추정하고, 그 변수를 전달함수로 변환하여 전달함수를 도출하였다.

[3단계: 시스템 식별 모델 파라메타의 선정]

시스템 식별에 대한 후보 모델구조 중에서 적합한 모델을 선정하기 위해서는 각각의 모델 구조에 포함된 매개변수 값을 추정해야 한다. 추정에 사용되는 기법은 최소자승법, 예측오차 식별방법(Prediction error identification, PEM) 등이 있다. 여기서 최소자승법은 성능함수를 정하고, 그 함수를 최소화 하는 매개변수를 결정하는 방법이고, 예측오차 식별방법은 모델구조가 매개변수에 대하여 선형적이지 않을 경우에 적용된다.

본 연구에서는 선체의 운동 중 횡요(Rolling)를 출력으로 사용하였다. 횡요는 다른 자유도 운동에 비해 비선형성이 강하게 나타나는 운동이므로 예측오차 식별방법을 사용하였다.

[4단계: 시스템 식별 모델의 검증]

상기의 절차를 통해 식별된 시스템의 특성이 실제 시스템을 잘 표현하는지 검증하는 단계를 거쳐야 한다. 시스템 모델의 매개변수를 추정기법을 잘 이용하여 추정하는 것도 중요하지만 획득한 모델 매개변수의 불확실성을 파악하는 것도 중요하다. 모델 추정치의 불확실성은 사용된 데이터와 선택한 모델구조의 적합성, 추정기법 등의 영향을 받는다.

본 연구에서는 선체의 운동전달특성을 식별하기 위해 상용도구인 Mathwork사의 매트랩(MATLAB)에서 제공되는 시스템 식별 툴박스(System identification toolbox)를 이용하였다.

2.2.2 시스템 식별을 위한 입력신호 결정

모델의 전달함수를 추정하기 위해서는 명확하게 정의된 해양 파가 필요하다. 본 연구에 적용한 해양 파를 정의하면 다음과 같다.

본 연구에서 제안한 시스템의 입력은 해양 파이다. 실제 해양 파의 환경은 파장, 주기, 파고 및 파의 입사방향이 불규칙하다. 불규칙성으로 인해 실제 환경을 조성하는 것은 매우 복잡하다. 본 연구는 해석이 가능한 시스템의 전달함수를 추정하는 것이 목적이다. 따라서 파의 형상을 Fig. 4와 같이 조화함수로 표현이 가능한 선형수면 파로 한정하였다. 이 때 수면의 형상은 식(2.4)로 나타낼 수 있다. 여기서 A 는 파의 진폭(amplitude), λ 는 파장(wave length), η 는 수표면(wave surface)이다.

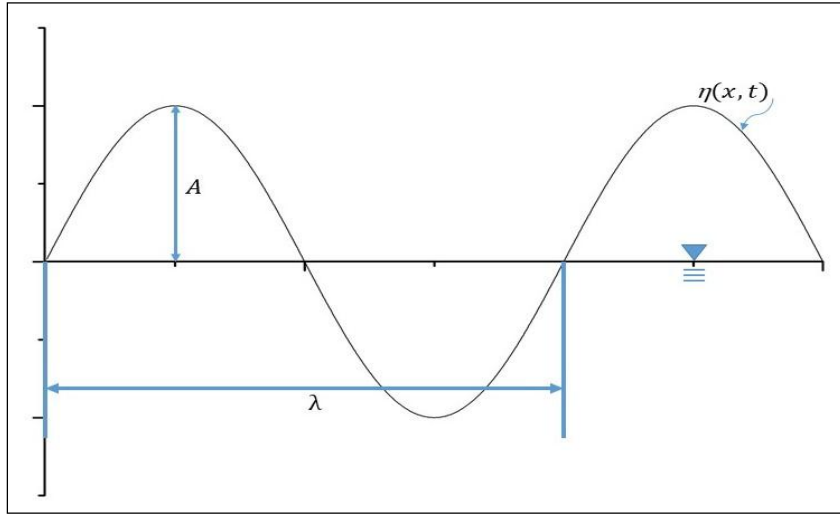


Fig. 4 Shape of linear water surface wave

$$\eta(x, t) = A \cos(kx - \omega t) = A \cos \Theta \quad (2.4)$$

여기서, x 는 파도의 진행방향, t 는 시간, A 는 파의 진폭, k 는 파수(wave number), ω 는 원진동수(angular frequency), Θ 는 위상함수(phase function), $\eta(x, t)$ 는 수표면 함수를 나타낸다.

또한 해양 파 유체입자의 속도벡터 u, v 는 각각 식(2.5), 식(2.6)과 같다.

$$u = \omega A \frac{\cosh k(y+h)}{\sinh kh} \sin(\omega t - kx) \quad (2.5)$$

$$v = \omega A \frac{\sinh k(y+h)}{\sinh kh} \cos(\omega t - kx) \quad (2.6)$$

여기서, x 는 파도의 진행방향, t 는 시간, A 는 파의 진폭, k 는 파수, ω 는 원진동수, u 와 v 는 속도벡터이다.

이외의 연구에 필요한 해양 파 수식에 대한 유도는 부록 A에 별도로 전개하였다.

본 연구에서 제안한 선체의 운동전달특성 모델링을 위한 입력으로서의 해양 파 신호는 초기조건 진폭 2.75 m, 파장 288 m로, 수심은 심해로 가정하고, 파의 형상은 선형사인 파를 사용하였다. 여기서 심해는 수심이 홀수의 2배를 넘는 경우이다. 진폭은 Wave scale 6에 해당하는 수치이며, 파장은 선체 길이와 같게 설정하였다. 정의한 초기조건에 따라 위상, 파수, 원주파수, 위상속도 및 수면 파의 변위를 **Table 1** 과 같이 계산하여 ANSYS-CFX 프로그램을 이용해 선체에 해양 파를 입사시켰다.

Table 1 Data for calculation of wave

Item	Calculation Result	Formula
wave height (2A)	5.5 [m]	
wave amplitude (A)	2.75 [m]	
wave length (λ)	288.0 [m]	
wave number (k)	$\frac{\pi}{144}$ [rad/m]	$\frac{2\pi}{\lambda}$
angular freq. (ω)	0.4626 [rad/s]	$\omega \approx \sqrt{gk}$
phase speed (c)	21.2051 [m/s]	$\frac{g}{\omega} \approx \sqrt{\frac{g}{k}}$
phase function (Θ)	$\frac{\pi}{144}x - 0.4626t$	$k(x - ct) = (kx - \omega t)$
wave surface $\eta(x, t)$	$2.75 \times \sin(\frac{\pi}{144}x - 0.4626t)$ [m]	$A \sin(kx - \omega t)$
	$2.75 \times \sin[(\frac{\pi}{144} - 1)\omega t]$ [m]	$A \sin(k - 1)\omega t$

2.2.3 시스템 식별을 위한 출력신호 결정

모델의 전달함수를 추정하기 위해서는 명확하게 정의된 선체운동의 수치화된 결과가 필요하다. 본 연구에 적용한 선체운동을 정의하면 다음과 같다.

본 연구에서 제안한 시스템의 출력은 선체운동이다. 선체운동을 정의하는 방정식은 모델링하는 선체운동 시스템을 정의한다. 이때 선체는 세장체이며, 횡단면의 형상은 좌우대칭이다. 선체의 운동과 유체력을 계산할 때 유체는 비점성, 비압축성, 유체 입자는 비회전성 운동을 한다고 가정한다. 또한 선체를 강체로 가정하여 계산한다(구종도, 2007). 선체 고정 좌표계는 **Fig. 5**와 같이 3차원 좌표계 $OXYZ$ 를 선박에 고정시킨 직교좌표계이다. 선박이 6자유도 운동을 하지 않는 정적인 상태에서 X 축, Y 축, Z 축의 교점을 원점 O 로 정의하여 선체를 선수미방향, 정횡방향, 수직방향으로 고정한다. 또한 본 좌표계는 **Table 2**와 같고, 수면 상 선체의 운동은 6자유도 운동으로 선체의 운동모드를 6개로 구분하여, 운동모드 1~3까지는 병진운동, 4~6까지는 모멘트에 의한 회전운동으로 정의할 수 있다(구종도, 2007). 본 연구는 선체의 X 축을 기준으로 하는 회전운동인 롤(roll) 운동을 중심으로 연구하고자 한다.

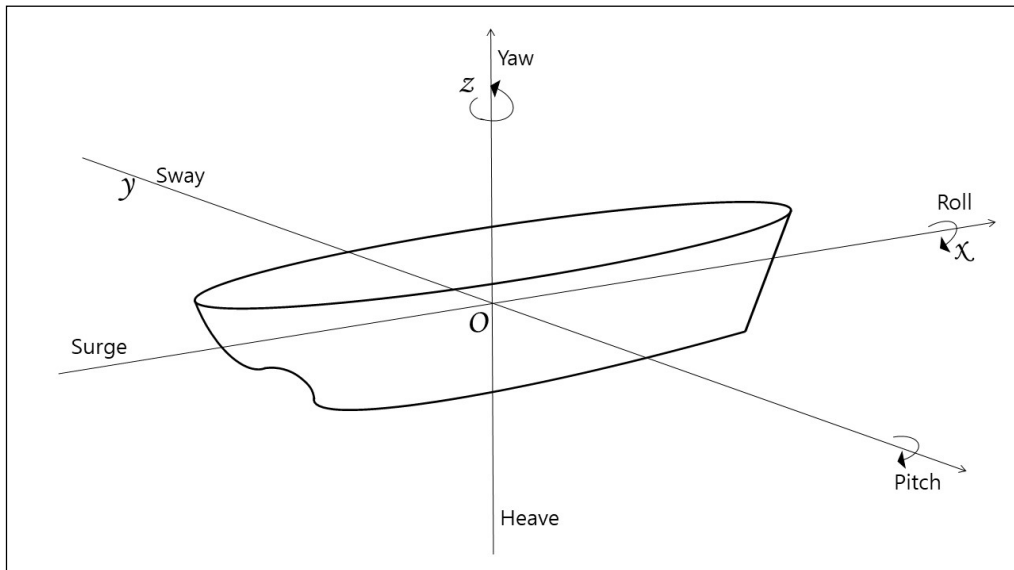


Fig. 5 Fixed ship coordinate system

Table 2 Ship' s kinematic mode

Item	Axis	Motion	Stability	Displacement	Velocity	Mode
Translational	x	Surge	×	x	u	1
	y	Sway	×	y	v	2
	z	Heave	○	z	w	3
Rotational	x	Roll	○	ϕ	p	4
	y	Pitch	○	θ	q	5
	z	Yaw	×	ψ	r	6

비선형 미분방정식으로 표현된 횡요 운동방정식은 식(2.7)과 같다.

$$(I_{44} + J_{44})\ddot{\phi} + N_{44}\dot{\phi} + C_{44}\phi = F_4 \quad (2.7)$$

여기서, I_{44} 는 횡요의 2차관성 모멘트, J_{44} 는 횡요부가관성 모멘트, N_{44} 는 횡요 감쇠계수, C_{44} 는 횡 복원 모멘트, F_4 는 파랑 강제 모멘트이다.

참고로, 부록 B에 횡요 운동방정식과 유체 지배방정식을 후술하였다.

선체운동 시스템의 출력신호는 선체운동의 각변위량이다. 선체운동의 각변위량은 시뮬레이션을 통해 획득하였다. 시뮬레이션에는 전산유체역학 프로그램 ‘ANSYS CFX 17.2’를 이용하였다. 전산유체 프로그램을 이용한 실험데이터 획득과정은 시뮬레이션 대상생성, 격자생성과 프로그램설정 및 연산방법으로 분류한다. 먼저 시뮬레이션 대상은 153,000 m³급의 LNG 선박으로 선정하였다. 시뮬레이션 대상은 델프트 공대(Delft University of Technology)에서 개발한 선형개발 프로그램인 델프트 쉽(Delft-Ship marine software)을 이용하여 생성하였다(Delftship, 2019). 이 때 사용한 대상 선박의

제원은 Table 3과 같고, 생성된 선박의 형상은 Fig. 6부터 Fig. 8과 같다. 시뮬레이션 대상의 주요 제원은 Hydrostatic-Table과 General Arrangement에서 획득한 길이(L), 선평(B), 흘수(d) 및 만재흘수 등의 제원(HHIC, 2009)과 Kim, B.-N. et al의 연구(2009)에서 이용된 K-LNG(KRISO Liquified Natural Gas carrier) 선형의 정면도 제원을 인용하였다. 또한 시뮬레이션을 위한 선체모델의 Condition은 Table 4와 같다.

Table 3 Particular of model ship

Type of ship	LNG carrier
Type of cargo tank	membrane tank (No.1 ~ No.4)
Cargo compartment capacity	153,000 m ³
Gross tonnage	100,216 ton
L.O.A / L.B.P	288.600 m / 276.000 m
Breadth (moulded)	44.000 m
Full loaded draft	12.4205 m
Displacement at full loaded draft	116,634.3 ton
Lightship weight	29,856.3 ton

Table 4 Loading condition of model ship

Draft Fore	9.319 m	KG	12.329 m
Draft Midship	9.321 m	GM	9.400 m
Draft Aft	9.324 m	Displacement	84,901.3 ton

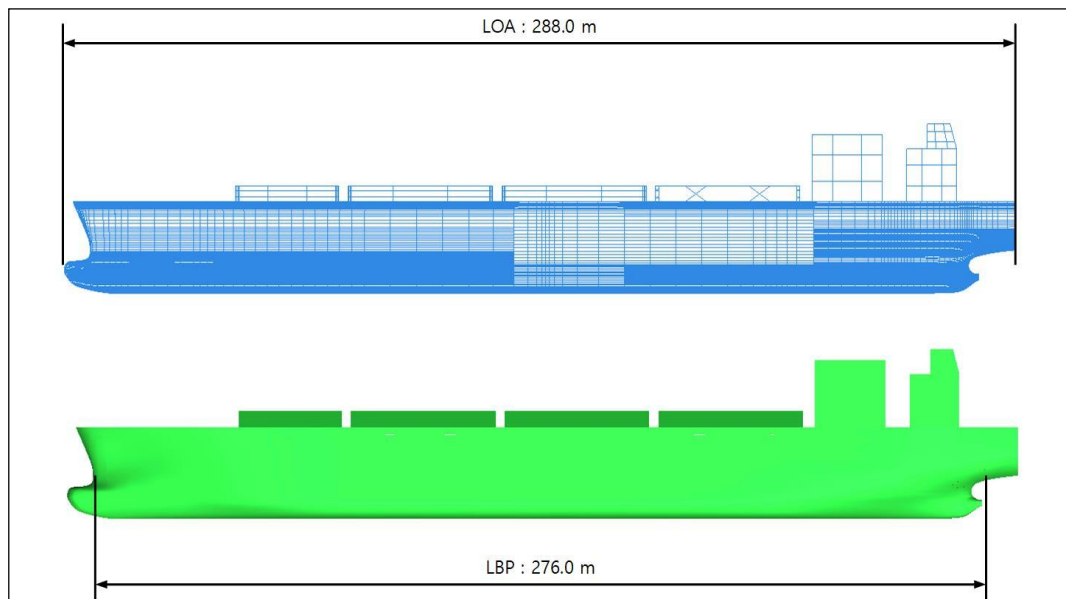


Fig. 6 Drawing of model ship (2D)

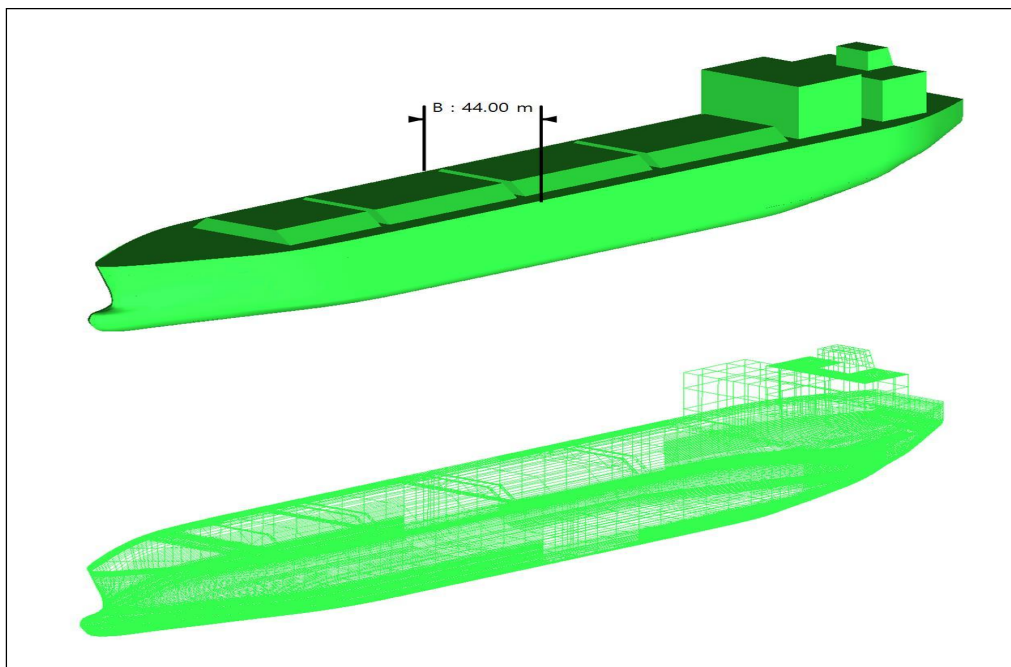


Fig. 7 Drawing of model ship (3D)

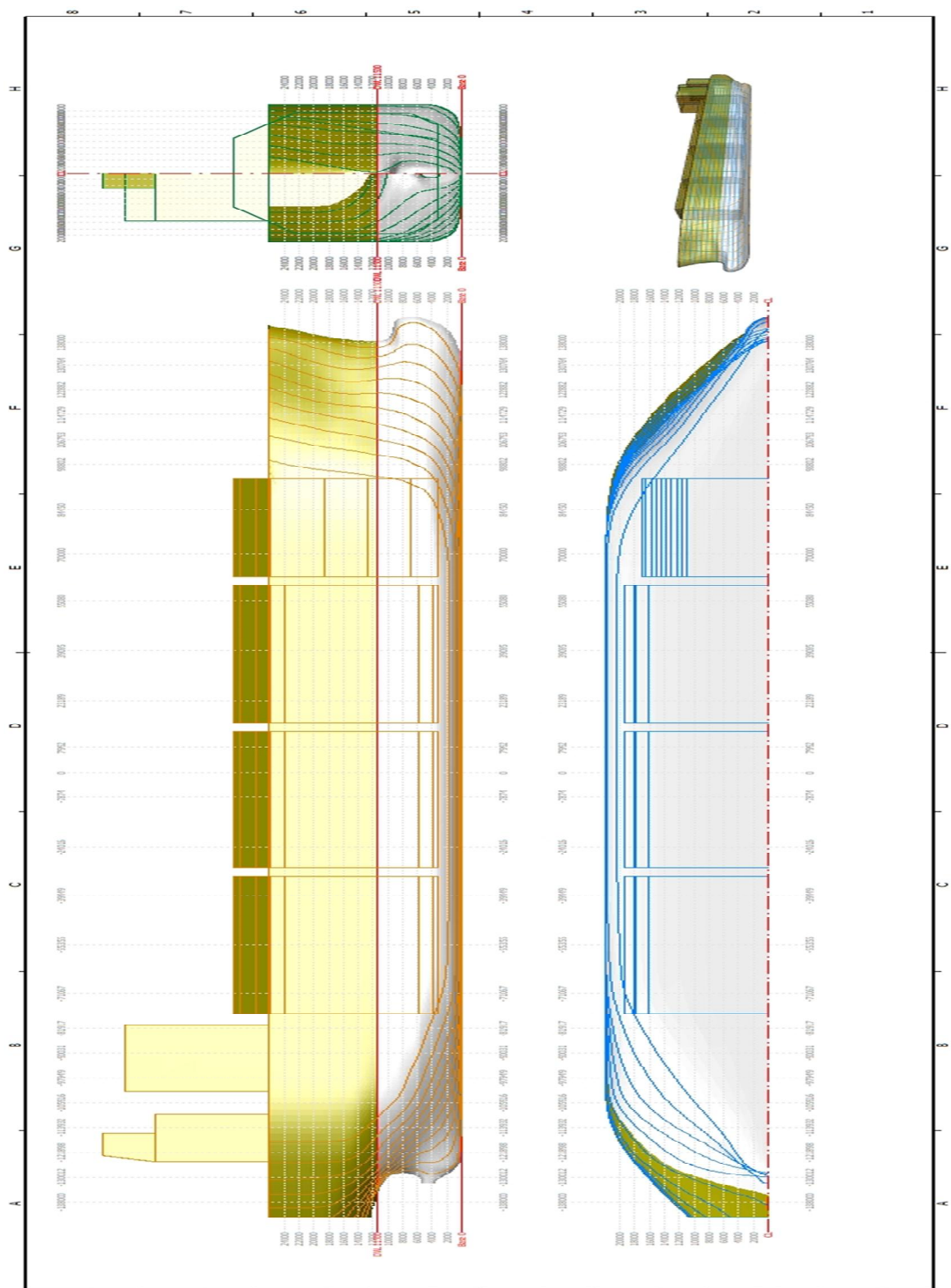


Fig. 8 Lines of model ship

격자계의 생성은 ICEM CFD 프로그램을 이용하였다. ICEM CFD는 디자인 대상을 점, 선, 면을 이용해 구현하는 프로그램이다. 이 때 디자인하고자 하는 대상의 수치는 무차원화 된 값이므로 주의가 필요하다. 전산유체 프로그램은 ANSYS-CFX 17.2를 사용하였다. ANSYS-CFX는 유한체적법을 기반으로 유동현상을 해석한다. 전산유체역학 프로그램을 이용한 유동현상의 시뮬레이션은 다음과 같은 4단계로 진행된다(ANSYS Inc., 2009). 그 진행과정은 Fig. 9 와 같이 나타냈다.

첫째, 시뮬레이션 하고자 하는 유동장의 성격 및 해석목표를 정한다. 유동장의 성격이 비산되는 유체인지, 회전체를 통과하는 유체인지, 주기성을 가지는 유체인지 고려하고, 구현한 유동장 내에서 해석하고자 하는 목표를 정한다.

둘째, 전처리과정에서는 모델의 형상, 격자계 생성, 물리량 입력 및 Solver의 계산방법을 설정한다. 모델의 형상을 생성할 때에는 해석에 필요한 전산량을 최소화하기 위해 모델을 단순화하는 것을 고려해야 한다. 격자계 또한 어떠한 형상의 격자를 사용하는 것이 경제적인가를 고려해야 한다. 마지막으로 물리량 및 Solver 설정 시에는 유동장의 초기조건과 해석대상의 경계조건 및 유체의 흐름을 설정하고, 계산에 필요한 전산량, 수렴하는 오차값 및 해석의 종료방법 등을 설정한다.

셋째, 모델을 해석한다.

넷째, 후처리과정에서는 해석한 결과를 검증하고 시각화한다. 해석 중 격자계의 파손이 발생하였는지 경계조건이 적절하게 유의성을 가지는지 검증한다. 유의성 있는 결과를 도출한 경우 이를 시각화하는 단계이다. 이후 결과가 유의성이 있다면 해석을 종료하고, 유의성을 도출하지 못한 경우 전처리 단계로 회귀하여 설정을 변경하여 다시 해석을 실시한다.

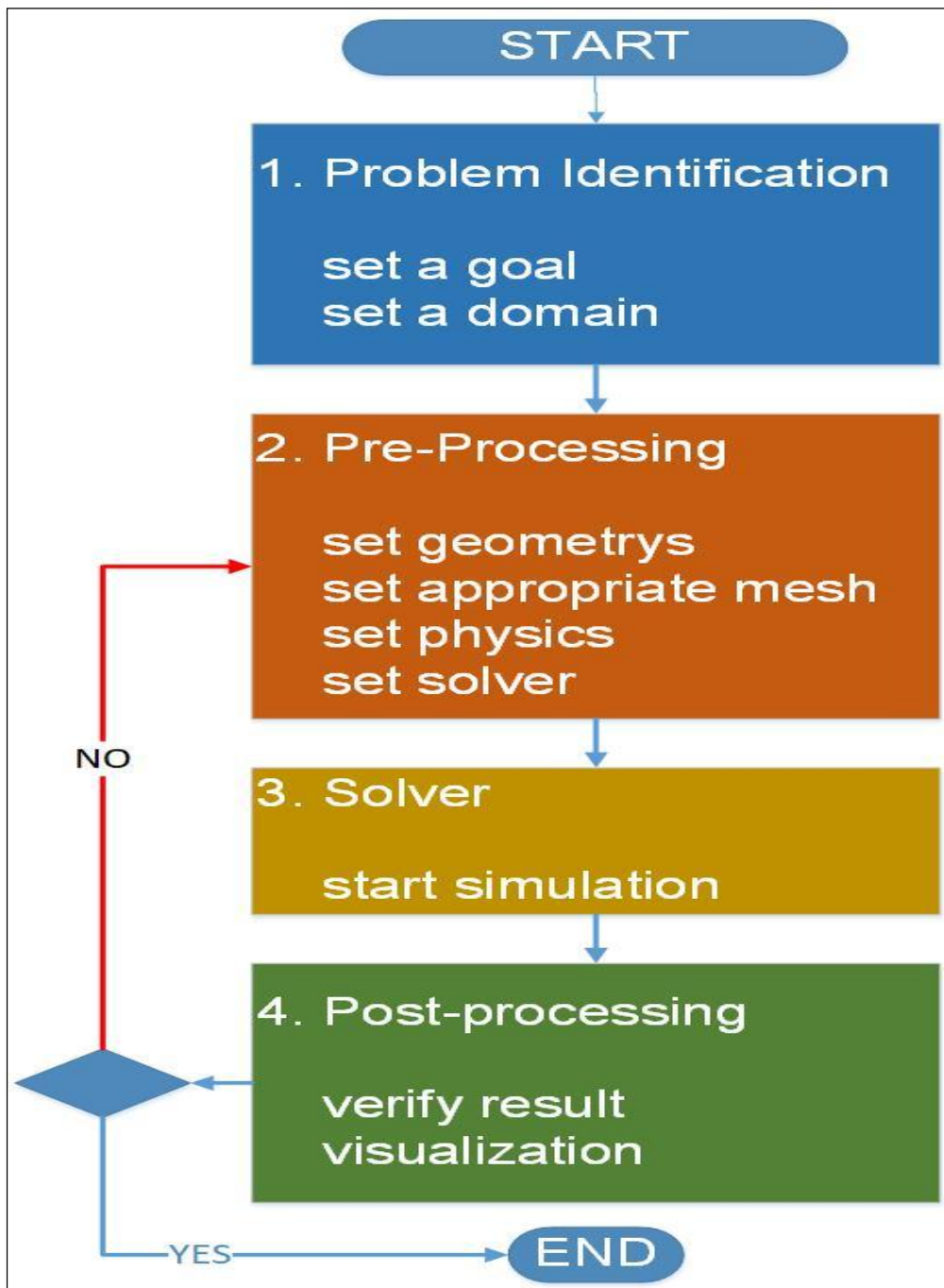


Fig. 9 CFD Analysis sequence

전체적인 유동장의 형상과 시뮬레이션의 설정은 1) 부터 3)과 같다.

1) 유동장 모델링

텔프트 쉽을 이용해 생성한 선체모델을 ICEM CFD에 전입(import)하였다. 이때 선체의 기준점을 측정한 후 이를 기준으로 수조의 형상을 생성하였다. 실험 시 유체와 강체의 도메인 간섭 및 시뮬레이션의 강건성을 확보하기 위하여 선체와 수조의 형상 사이에 유동장 조건을 부여하였다. 유동장과 선체의 전체 형상은 Fig. 10 부터 Fig. 12 와 같다.

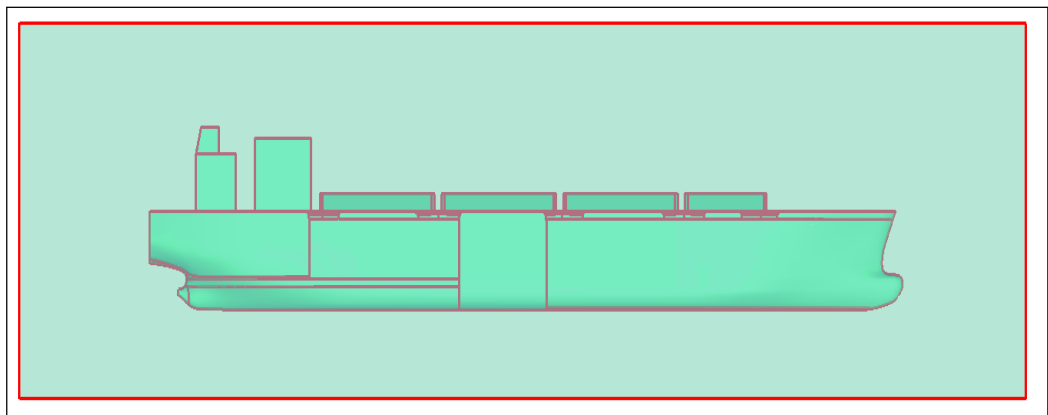


Fig. 10 Fluid domain (Side view)

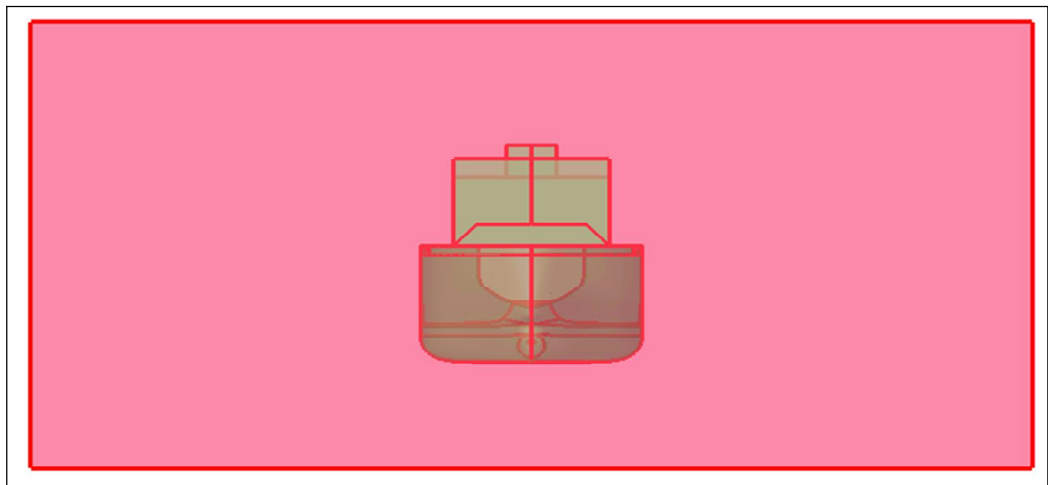


Fig. 11 Fluid domain (Front view)

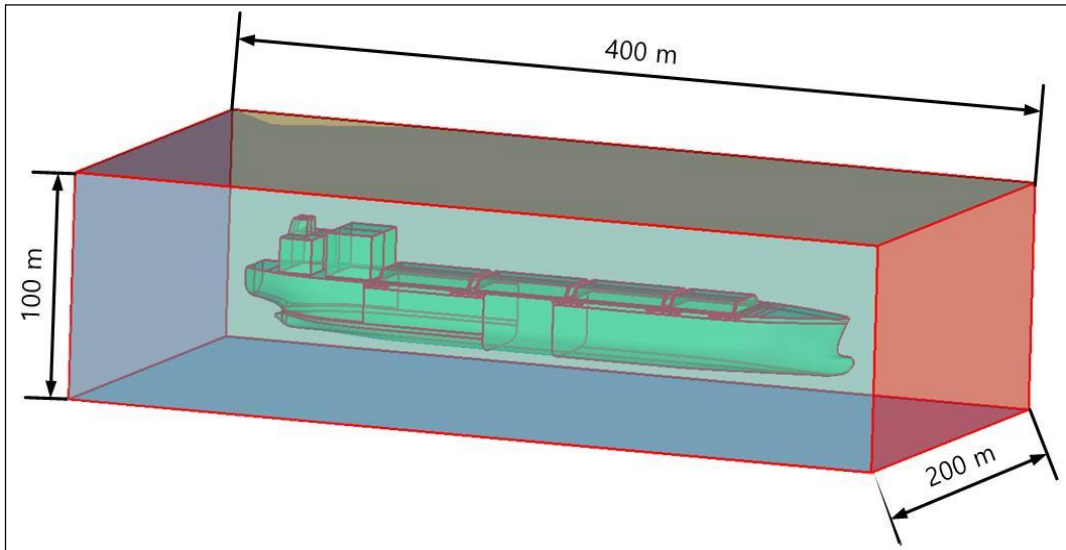


Fig. 12 Fluid domain (Isometric view)

2) 격자생성

ICEM CFD를 이용하여 **Fig. 13** 부터 **Fig. 16** 과 같이 전체 유동영역에는 Tetra mesh를 생성하고, 선체의 벽면에는 Prism 격자를 생성하였다. **Fig. 16** 과 같이 Prism mesh를 배치하여 강제인 선체와 유동장 사이의 강건성을 확보하였다. 최종적으로 격자화한 유동장과 선체의 형상은 **Fig. 17** 과 같고, 이 때 사용한 전체 격자의 수는 약 2,429,959개로 **Table 5** 와 같다.

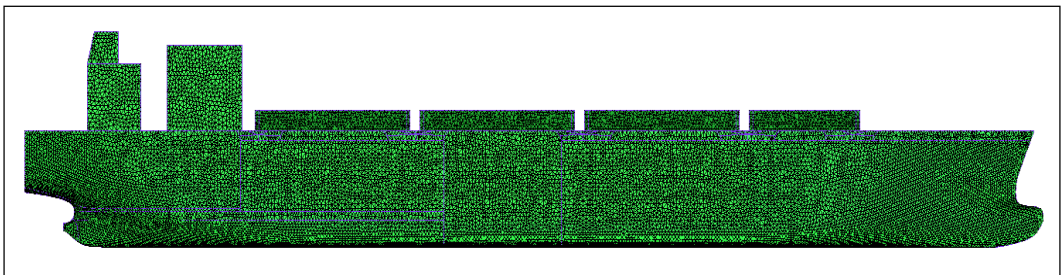


Fig. 13 Mesh generation on hull using ICEM CFD (Side view)

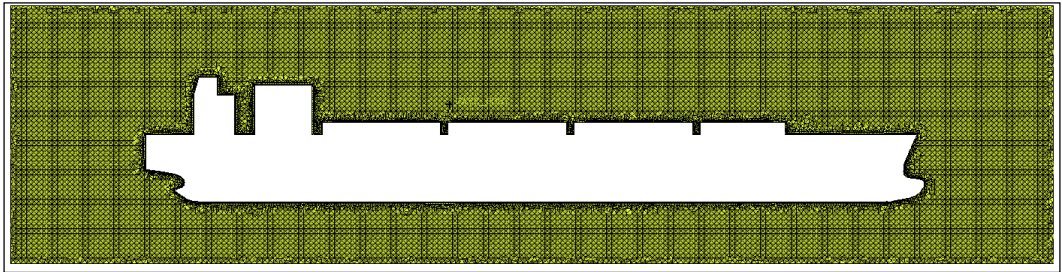


Fig. 14 Mesh generation on fluid domain using ICEM CFD(Side view without vessel)

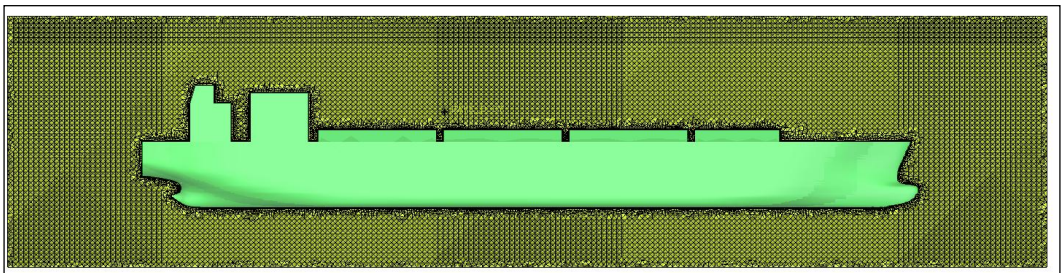


Fig. 15 Mesh generation using ICEM CFD (Side view)



Fig. 16 Mesh generation using ICEM CFD (Aft part side view)

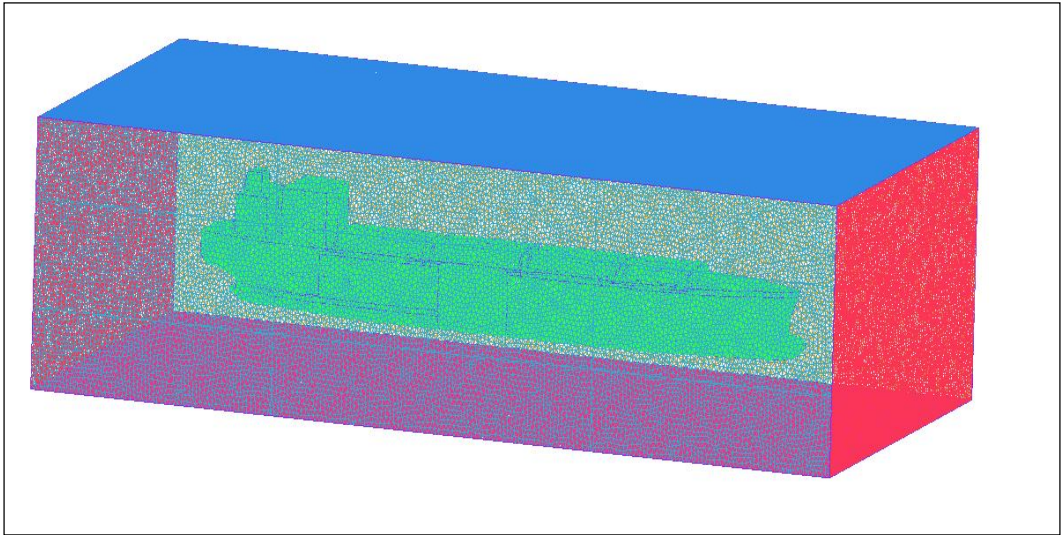


Fig. 17 Mesh generation using ICEM CFD (Isometric view)

Table 5 Mesh information of fluid domain

Fluid domain	Mesh number
Total elements	13,793,489
Total nodes	2,429,959

3) 경계조건 및 해석조건

파의 주기에 따른 자유표면에서의 선체 거동 해석방법으로, 균질 다상 유동 모델을 사용하여 물과 공기 2상의 유체에 대한 다상 유동 해석을 수행하였다. **Fig. 18** 과 같이 좌측벽면은 파가 유입되는 입구를 개방된 면(opening wall)으로 설정하였다. 위쪽벽면은 공기가 자유 출입 가능하도록 열린면으로 설정하였다. 유동장의 우측벽면은 출구(outlet)로서 깊이에 따른 정수압 $p = \rho gh$ 를 개방된

면으로 부여하였고, 바닥은 고체벽면으로 가정하여 심해 파를 시뮬레이션하기 위하여 점착조건(free-slip)을 적용하였다. 그리고 자유표면에서의 거동을 해석하기 위하여 등균질(homogeneous) 다상유동모델을 사용하였다. 선체는 강체(rigid body)로 가정하여 Fig. 19 와 같이 정의하였다. 단위는 MKS 단위계를 차용하여 무게를 Kg 단위로 변환하였고, 1자유도 회전운동을 시뮬레이션하기 위하여 x 축방향의 회전운동만을 활성화하였다. 좌표계는 우수좌표계인 관성좌표계로 z 축 하방향에 중력가속도가 작용하도록 설정하였다.

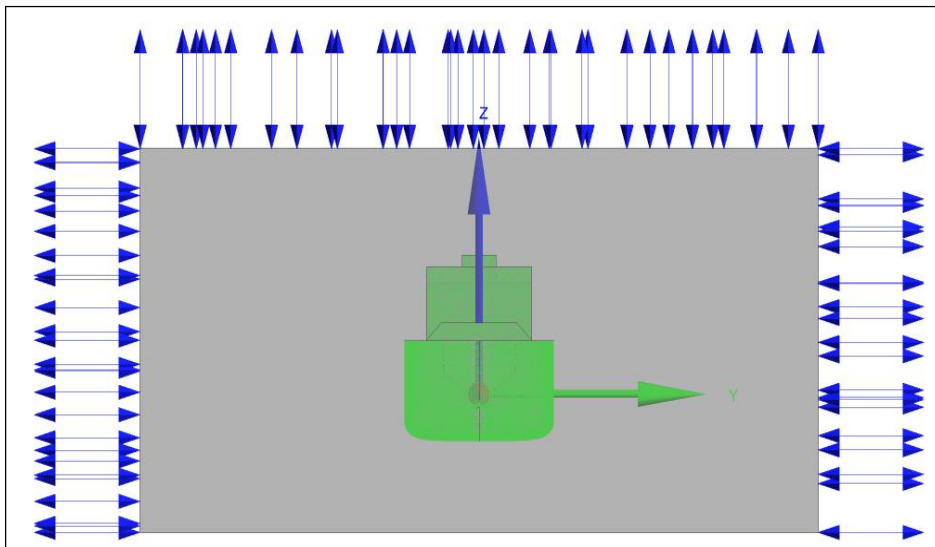


Fig. 18 Opening wall boundary condition which is visualized by ANSYS-CFX (inlet & outlet)

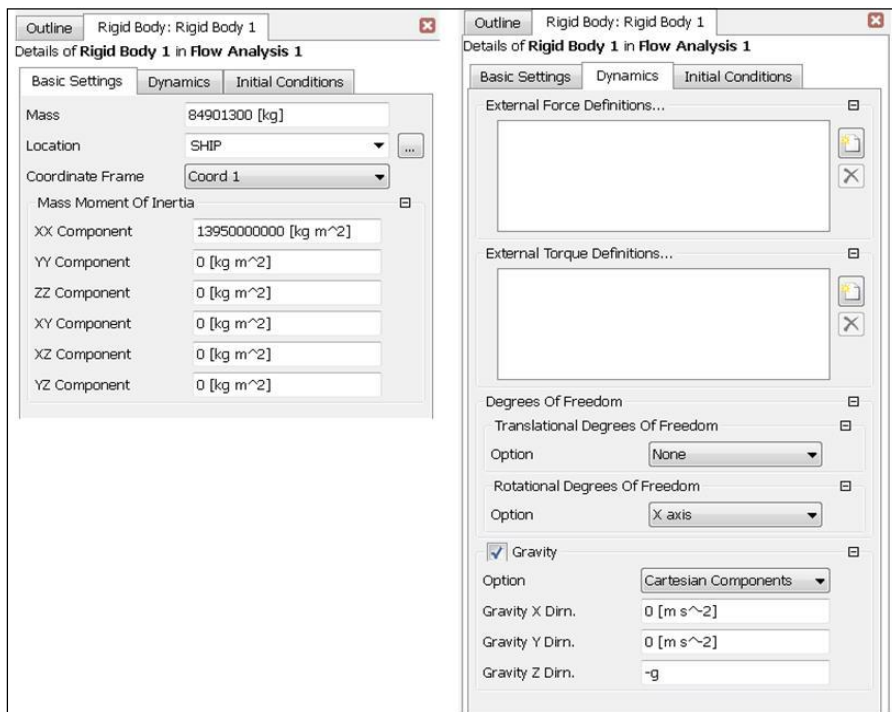


Fig. 19 Details of rigid body setting on ANSYS-CFX

2.2.4 전달함수 추정 방법

위에서 정의된 해양 파와 롤 운동을 이용하여 시스템 식별을 통한 전달함수 추정 방법을 설명하면 다음과 같다.

모델의 전달함수는 MATLAB의 시스템 식별 툴박스(System identification toolbox)를 이용하여 추정하였다. 데이터의 비교를 위하여 단위응답이 빠른 모델과 느린 모델 두 가지를 추정하였다. 전달함수 추정실험의 순서 및 설정은 4단계로 구성되고, Fig. 20부터 Fig. 23과 같다.

1단계, 시스템의 입·출력 신호를 시스템 식별 코드에 입력한다.

2단계, 입·출력 신호를 신호처리할 모델을 선택한다. 본 연구에서는 상태공간 모델을 사용하였다.

3단계, 선택한 모델의 추정 방법을 선택한 후 시스템 식별을 실시한다.

4단계, 추정한 모델을 극-영점해석, 단위응답해석, 시스템 일치도를 판정하여 추정한 시스템의 유의성을 평가한다.

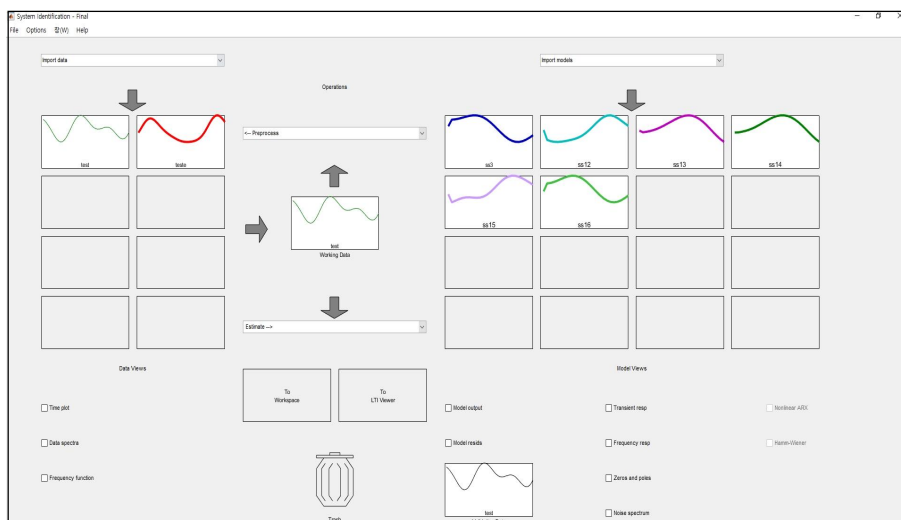


Fig. 20 Snap shot of System identification tool box

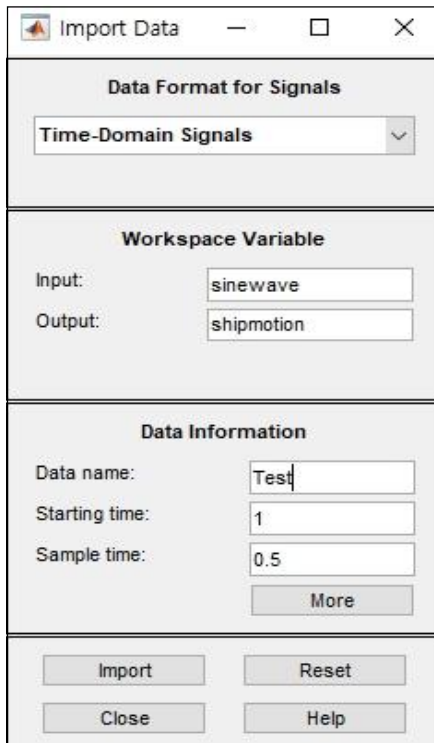


Fig. 21 Snap shot of data input window

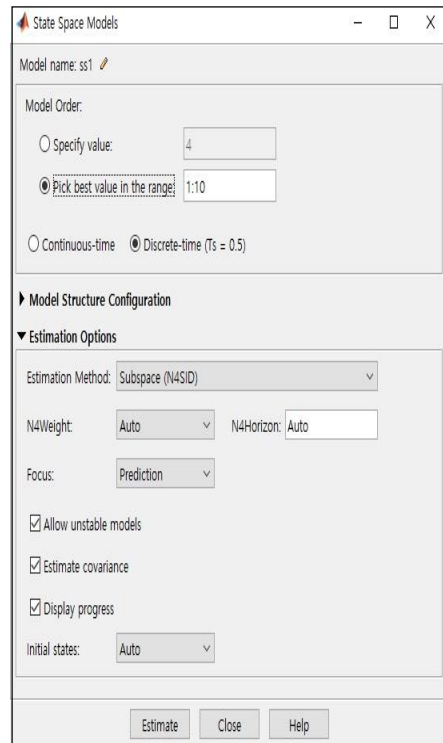


Fig. 22 Snap shot of model setting window

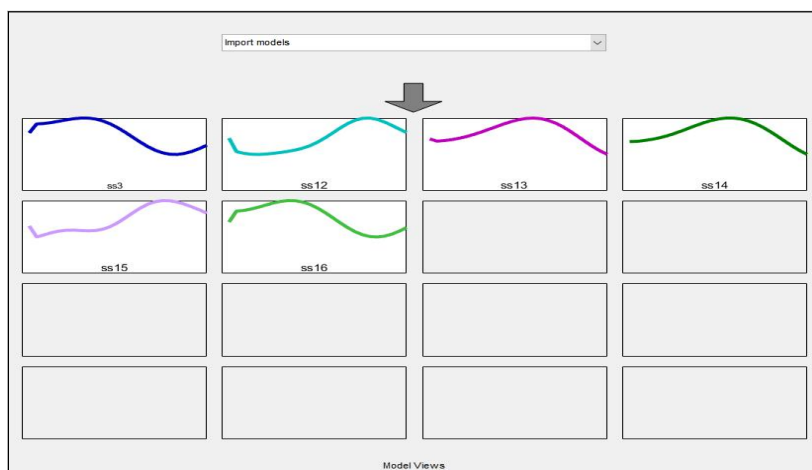


Fig. 23 Snap shot of candidate model

제 3 장 실험 및 결과

3.1 실험 데이터 획득 결과

실험 데이터는 두 가지를 획득하였는데, 하나는 해양 파 데이터이고, 다른 하나는 선체운동 데이터이다.

Fig. 24 는 2.2.2장에서 정의한 초기조건을 이용하여 계산한 해양 파를 x -축의 시간을 따라서 나타낸 것이다.

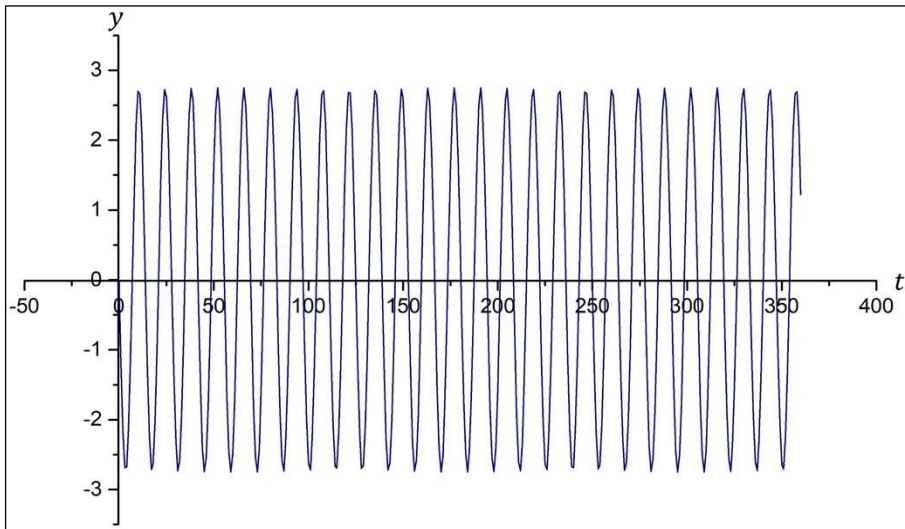


Fig. 24 Incident wave used as input signal

선체운동 데이터는 ANSYS-CFX를 이용한 시뮬레이션을 통하여 획득하였다. ANSYS-CFX를 이용하면 6-DOF의 선체운동을 획득할 수 있는데, 본 연구에서는 횡요의 각 변위량만을 선체운동 데이터로 이용하였다. 횡요 데이터만 사용한 이유는 선박에서 횡동요가 항해 중 선박의 안전에 가장 큰 영향을 미치고, 제안한 운동전달특성 모델의 유효성을 간단하게 평가하기

위함이다. 다른 6-DOF 선체운동에 대한 연구는 추후 연구로 남겨두고자 한다.

Fig. 25는 선체 횡 동요의 각변위량 획득 결과를 나타낸 것으로, 시뮬레이션을 통한 결과 중에서 선체 횡 동요가 정상상태가 되는 100회의 반복 스텝부터 400회의 반복 스텝까지의 각변위량을 나타낸다. 여기서, ANSYS CFX를 이용하여 선체 횡 동요를 계산하는 경우, 초기 비정상 운동이 발생한다. 정상상태일 때의 데이터 획득을 위해서는 충분한 시간을 갖는 반복 계산이 필요하다. 따라서 횡요 계산은 0.5초의 스텝 간격으로 400회 반복하여 계산하여 총 계산시간은 200초가 된다.

Fig. 26은 정상상태에 돌입한 선체 운동의 모습 중에서 일부를 나타낸 것으로, ANSYS-CFX의 선체운동 가시화 기능을 이용하여 획득한 것이다. 참고로, 부록 C에 시간 100초부터 110초 사이를 0.5초 간격으로 구분한 선체운동의 모습을 나타냈다.

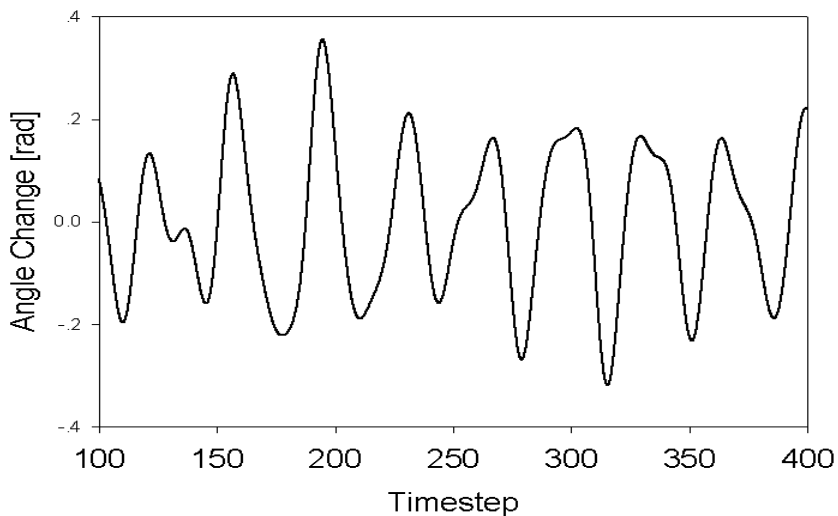


Fig. 25 Ship motion used as output signal which is calculated by ANSYS-CFX

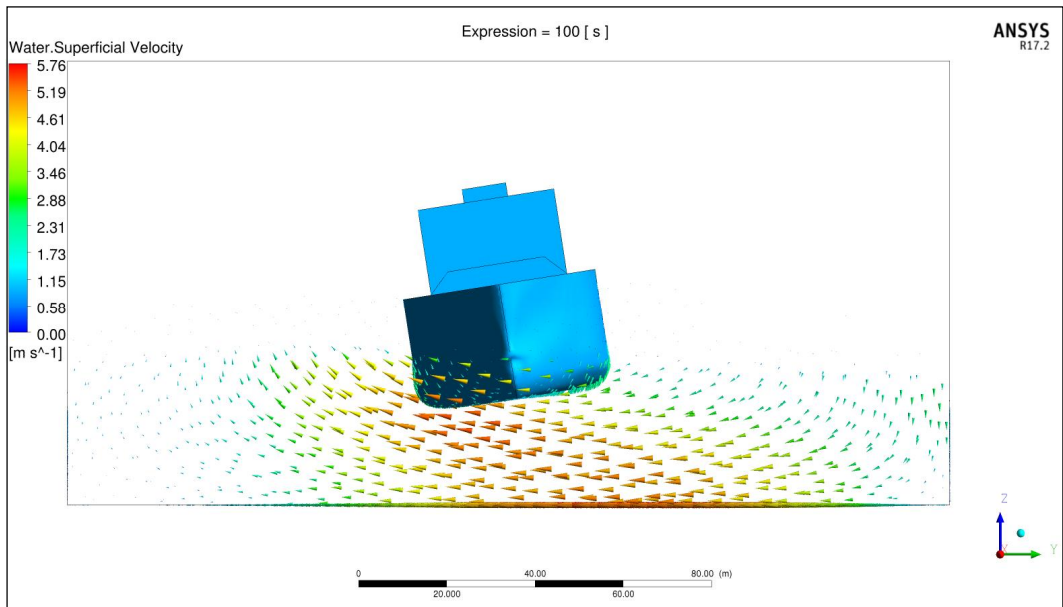


Fig. 26 Snap shot of ship' s roll motion at time t=100.0 sec which is visualized by ANSYS-CFX

3.2 전달함수 추정 결과

3.2.1 전달함수의 계수 추정 결과

시스템 식별법을 이용하여 추정한 전달함수는 두 가지로 구분하여 나타냈는데, 하나는 상태변수의 차원이 큰 경우의 전달함수 추정 결과이고, 다른 하나는 상태변수의 차원이 작은 경우의 전달함수 추정 결과이다. 특히, 전달함수를 z -영역에서 구하는 경우, 최적의 상태 공간(state space)을 구축하기 위한 차원의 결정이 필요하다. 그러나 최적 차원을 기술적으로 결정할 수 있는 방법은 없고, 반복적인 상태공간의 해석을 통해서 구해야 한다. 그래서 본 연구에서는 상태 공간을 설명하는 상태 변수들의 차원이 큰 경우와 작은 경우로 구분하여 전달함수를 구하고, 이 둘의 결과를 비교하였다. 상태 변수 차원의 크기는 전달함수 $H(z)$ 을 구성하는 계수(coefficients)의 차수를 의미하는

것으로, 본 연구에서는 반복적인 사전 계산을 통하여 차원이 큰 경우와 작은 경우를 구분하였다. 구분결과, 차원이 큰 경우는 10차의 계수 a 와 11차의 계수 b 을 적용하고, 차원이 작은 경우는 7차의 계수 a 와 8차의 계수 b 을 적용하는 경우 이 둘 사이에 뚜렷한 차이가 나타났다.

상태변수의 차원이 큰 경우와 작은 경우 각각의 전달함수는 입·출력 신호를 상태공간에서 전개한 후 이를 이산시간의 전달함수로 변환하여 획득하였다.

10차의 계수 a 와 11차의 계수 b 을 적용한 전달함수 $H_1(z)$ 의 방정식은 다음 식(3.1)로 나타낼 수 있고, 계산을 통하여 획득한 이들 계수들의 값을 Table 6에 정리하여 나타냈다.

$$H_1(z) = \frac{a_1 z^9 + a_2 z^8 + a_3 z^7 + a_4 z^6 + a_5 z^5 + a_6 z^4 + a_7 z^3 + a_8 z^2 + a_9 z + a_{10}}{b_1 z^{10} + b_2 z^9 + b_3 z^8 + b_4 z^7 + b_5 z^6 + b_6 z^5 + b_7 z^4 + b_8 z^3 + b_9 z^2 + b_{10} z + b_{11}} \quad (3.1)$$

Table 6 Coefficient of transfer function $H_1(z)$

n	a_n	b_n
1	+ 1.505e07	+ 1.000
2	- 9.750e07	- 7.534
3	+ 2.849e08	+ 25.710
4	- 4.965e08	- 52.660
5	+ 5.780e08	+ 72.420
6	- 4.797e08	- 71.210
7	+ 2.946e08	+ 52.040
8	- 1.330e08	- 28.670
9	+ 3.998e07	+ 11.560
10	- 5.930e06	- 3.0530
11	-	+ 0.3908

7차의 계수 a 와 8차의 계수 b 을 적용한 전달함수 $H_2(z)$ 의 방정식은 다음 식(3.2)로 나타낼 수 있고, 계산을 통하여 획득한 이들 계수들의 값을 Table 7에 정리하여 나타냈다.

$$H_2(z) = \frac{a_1 z^6 + a_2 z^5 + a_3 z^4 + a_4 z^3 + a_5 z^2 + a_6 z + a_7}{b_1 z^7 + b_2 z^6 + b_3 z^5 + b_4 z^4 + b_5 z^3 + b_6 z^2 + b_7 z + b_8} \quad (3.2)$$

Table 7 Coefficient of transfer function $H_2(z)$

n	a_n	b_n
1	-0.01847	1
2	0.0103	-6.287
3	0.02422	17.3
4	0.03104	-27.02
5	0.02295	25.87
6	0.009324	15.17
7	0.001633	5.05
8	-	-0.7355

3.2.2 전달함수의 극-영점 분석 결과

$H_1(z)$ 에 대한 극-영점(poles-zeros)과 단위 응답을 평가하였다. Fig. 27은 $H_1(z)$ 의 극-영점을 z -영역에서 나타낸 것으로, 단위 원 안에 극점과 영점이 있고, 극점과 영점이 서로 대칭구조인 경우 시스템이 안정하다고 평가한다. Fig. 27은 이러한 조건을 모두 만족하기 때문에 추정된 $H_1(z)$ 는 안정함을 알 수 있다. Fig. 27의 극-영점의 좌표는 Table 8과 같다. 아울러 Fig. 28은

이러한 극-영점을 갖는 $H(z)$ 의 단위응답(step response)을 나타낸 것으로, 단위응답은 시스템의 발산 여부를 알기 위한 것이다. 이 그림에서 추정한 $H_1(z)$ 는 수렴을 하되, 약 8,000초에서 수렴하는 것으로 나타났다.

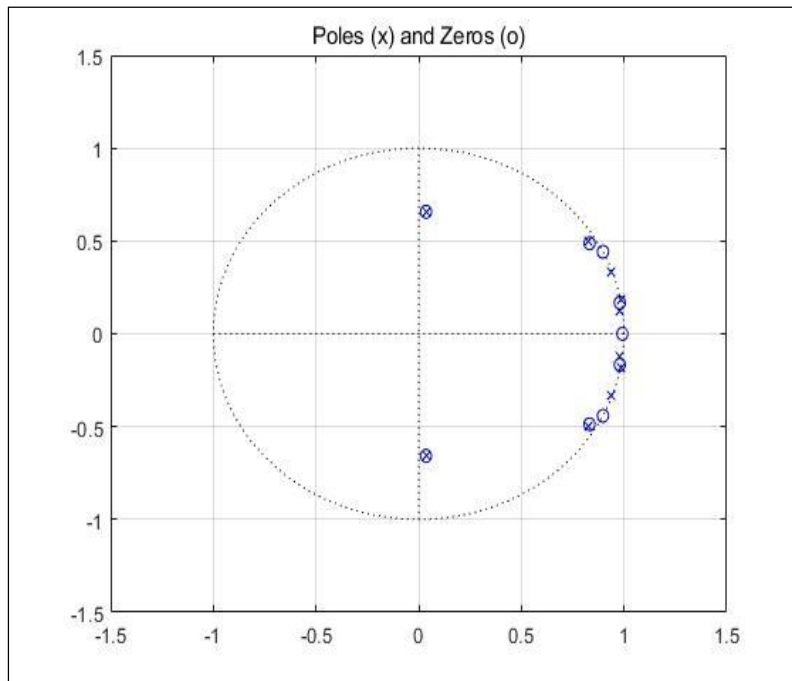


Fig. 27 Pole - zero plot of $H_1(z)$

Table 8 Grid of poles and zeros $H_1(z)$

Poles		Zeros	
Real Parts	Imaginary parts	Real Parts	Imaginary parts
0.0356	+ 0.6573i	0.0356	+ 0.6574i
0.0356	- 0.6573i	0.0356	- 0.6574i
0.8275	+ 0.4948i	0.8315	+ 0.4871i
0.8275	- 0.4948i	0.8315	- 0.4871i
0.9396	+ 0.3314i	0.8971	+ 0.4418i
0.9396	- 0.3314i	0.8971	- 0.4418i
0.9834	+ 0.1801i	0.9920	+ 0.0000i
0.9834	- 0.1801i	0.9794	+ 0.1666i
0.9806	+ 0.1262i	0.9794	- 0.1666i
0.9806	- 0.1262i	×	

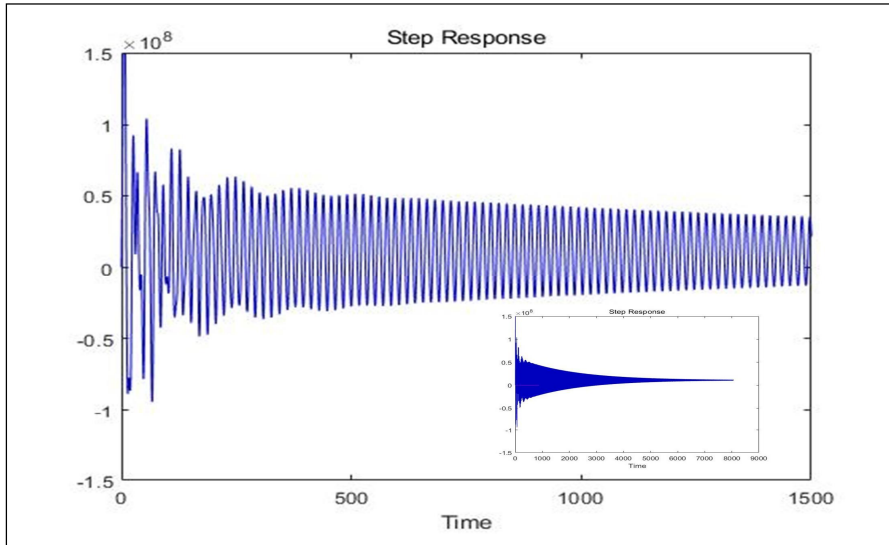


Fig. 28 Step response of $H_1(z)$

$H_2(z)$ 에 대한 극-영점(poles-zeros)과 단위 응답을 평가하였다. Fig. 29는 $H_2(z)$ 의 극-영점을 z -영역에서 나타낸 것으로, 단위원 외에 극-영점 분포가 발견되어 $H_2(z)$ 는 불안정함을 알 수 있다. Fig. 29의 극-영점의 좌표는 Table 9와 같다. 아울러 Fig. 30은 이러한 극-영점을 갖는 $H_2(z)$ 의 단위응답(step response)을 나타낸 것으로 추정된 $H_2(z)$ 는 수렴을 하되, 약 900초에서 수렴하는 것으로 나타났다.

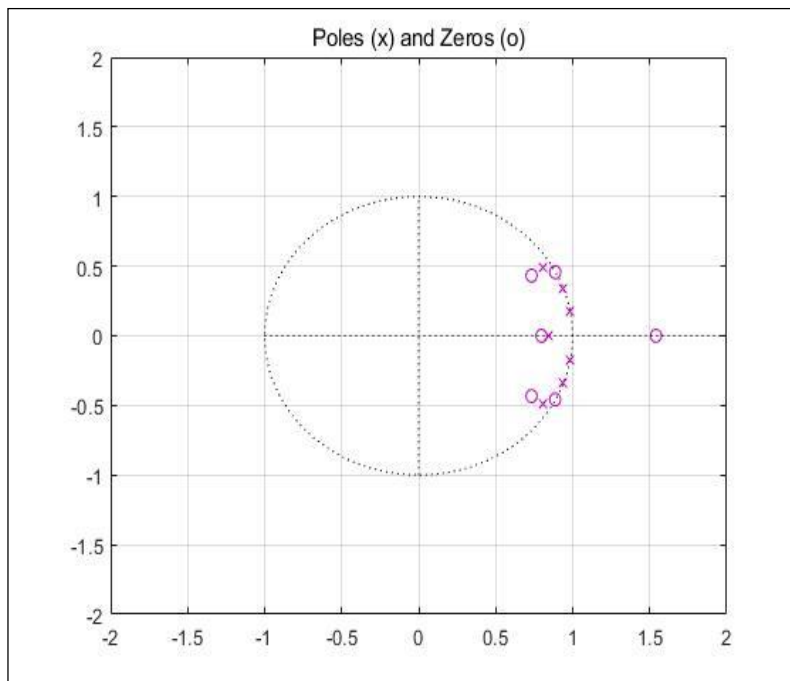


Fig. 29 Pole - zero plot of $H_2(z)$

Table 9 Grid of poles and zeros $H_2(z)$

Poles		Zeros	
Real Parts	Imaginary parts	Real Parts	Imaginary parts
0.8026	+ 0.4927i	1.5407	+ 0.0000i
0.8026	- 0.4927i	0.8860	+ 0.4572i
0.9390	+ 0.3324i	0.8860	- 0.4572i
0.9390	- 0.3324i	0.7329	+ 0.4325i
0.9814	+ 0.1757i	0.7329	- 0.4325i
0.9814	- 0.1757i	0.7971	+ 0.0000i
0.8408	+ 0.0000i	×	

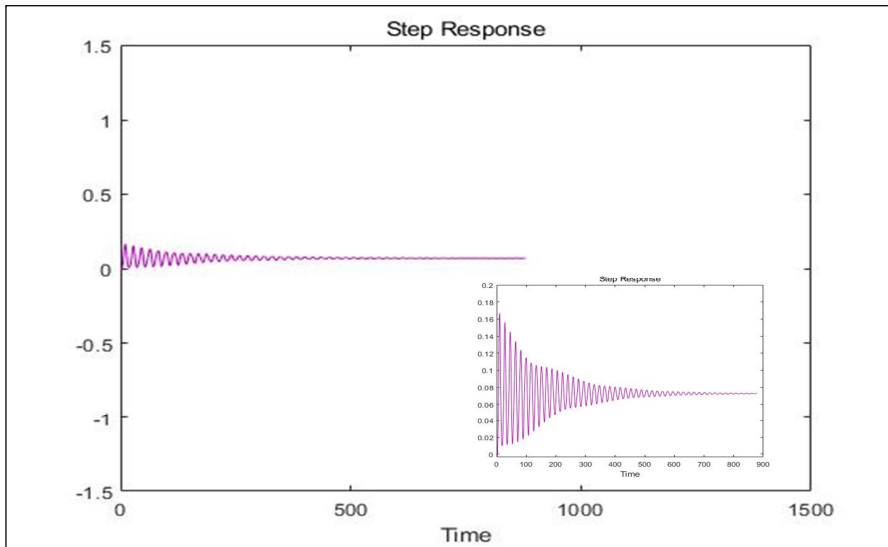


Fig. 30 Step response of $H_2(z)$

3.2.3 전달함수의 파워스펙트럼 분석 결과

$H(z)$ 에 대한 주파수영역에서의 파워스펙트럼(power spectrum)을 평가하였다. Fig. 31과 Fig. 32는 각각 상태변수 차원이 큰 전달함수와 작은 전달함수의 파워스펙트럼으로서 $10^{-2}(\text{rad/sec})$ 부터 $10^{-1}(\text{rad/sec})$ 까지는 완만한 특성을 나타내다가 $10^{-1}(\text{rad/sec})$ 부터 $10^1(\text{rad/sec})$ 까지 급격한 감소를 보이고 있다. 이 현상은 입력으로 주어진 해상 파에 대해서 선체가 응답한 주파수를 의미하는 것으로, 대상 선박이 대형 선박임을 고려할 때 타당한 현상인 것으로 고려된다.

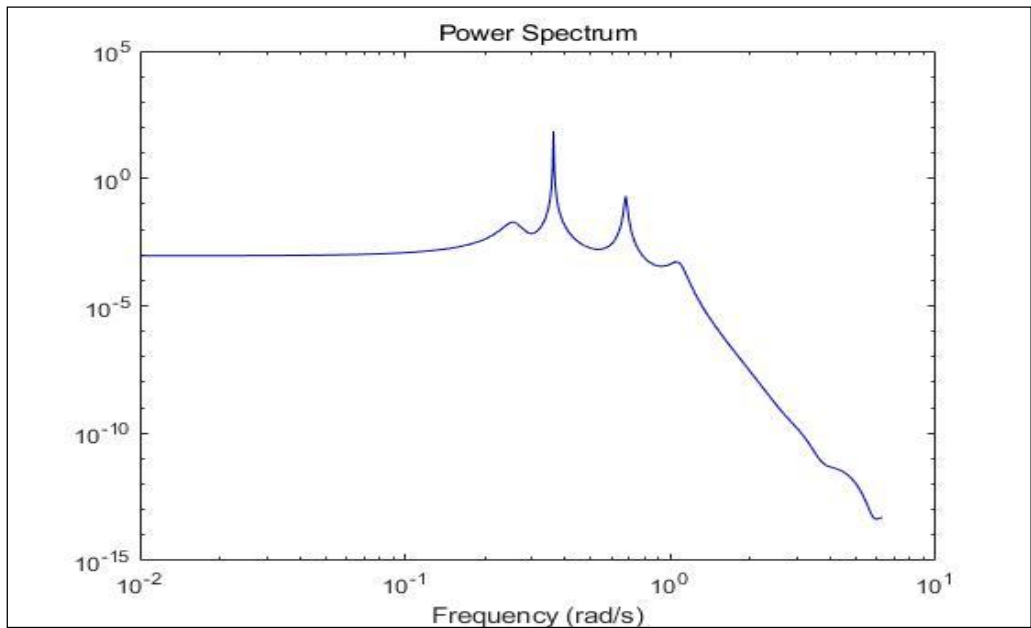


Fig. 31 Power spectrum of estimated transfer function $H_1(z)$

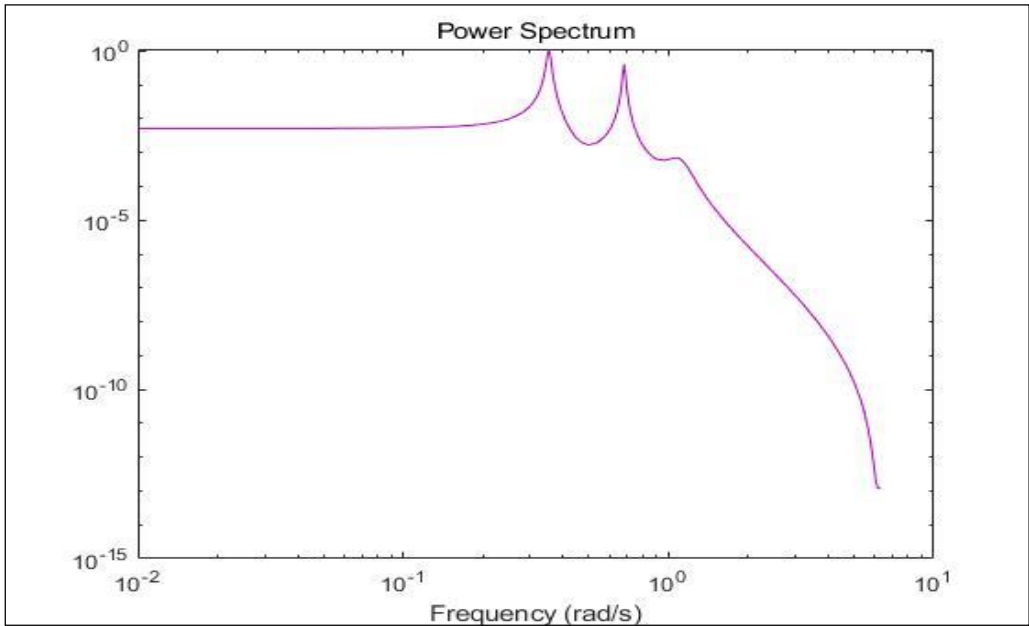


Fig. 32 Power spectrum of estimated transfer function $H_2(z)$

3.2.4 차원에 따른 전달함수 추정결과의 비교

극-영점 사상 결과 상태변수의 차원이 큰 경우 9개의 영점과 10개의 극점을 산출하였고, 모두 단위원 내에 존재함을 확인하였다. 반면 상태변수의 차원이 작은 경우 6개의 영점과 7개의 영점을 산출하여 전자에 비해 상대적으로 단순하고 수렴이 빠른 시스템을 구현하였으나, 시스템안정도는 불안정하였다.

시뮬레이션으로 획득한 선체운동과 시스템 식별법을 이용해 추정한 출력신호의 비교결과 상태변수의 차원이 큰 경우 79.5%, 상태변수의 차원이 작은 경우 50.0%의 추정율을 가지는 것을 확인하였다. 또한 비선형적 특성을 가진 시스템을 선형화하여 추정하는데 있어서는 단위응답 수렴의 신속성과 시스템의 안정성을 동시에 충족하기는 힘들다는 것을 확인하였다.

Table 10 Comparison of experimental case

Item	High order state space	Low order state space
Stability	stable	unstable
Unit response feature	long term response	short term response
Convergency	converged	converged

3.3 모델에서 추정한 롤 운동 분석 결과

Fig. 33은 시간영역에서 상태변수가 큰 모델에서 추정한 롤 운동 $\hat{Y}(z)$ 과 모델의 전달함수 추정에 적용한 원래의 롤 운동 $Y(z)$ 을 비교한 결과이다. 두 롤 운동 $\hat{Y}(z)$ 와 $Y(z)$ 의 일치율(%)은 79.5%로 나타났다.

Fig. 34는 시간영역에서 상태변수가 작은 모델에서 추정한 롤 운동 $\hat{Y}(z)$ 과 모델의 전달함수 추정에 적용한 원래의 롤 운동 $Y(z)$ 를 비교한 결과이다. 두 롤 운동 $\hat{Y}(z)$ 와 $Y(z)$ 의 일치율(%)는 50.0%로 나타났다.

따라서 상태변수가 큰 모델이 작은 모델과 비교하여 약 1.6배 더 정확한 일치율을 나타내므로, 상태변수에 따라서 모델의 정밀도가 변함을 알 수 있다.

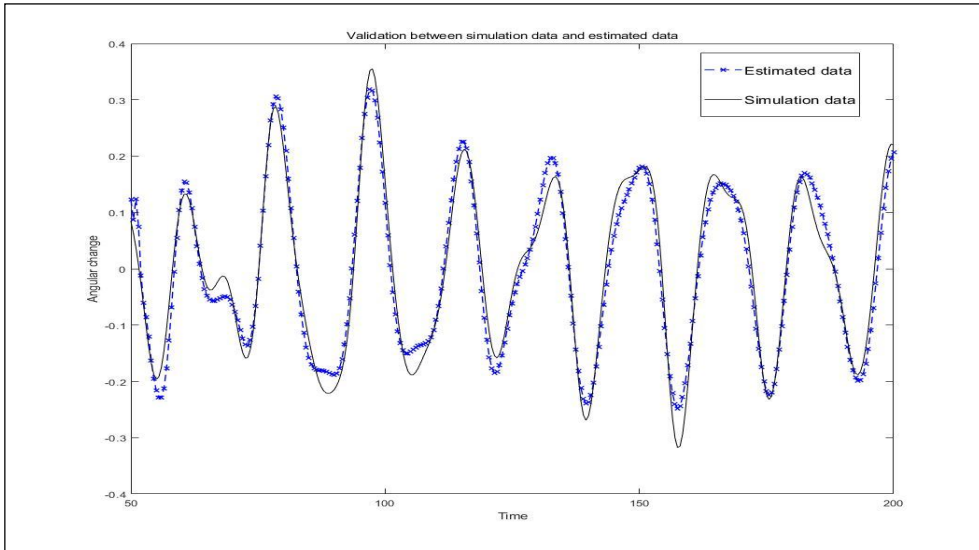


Fig. 33 Verification between measured and simulated output(High order state space)

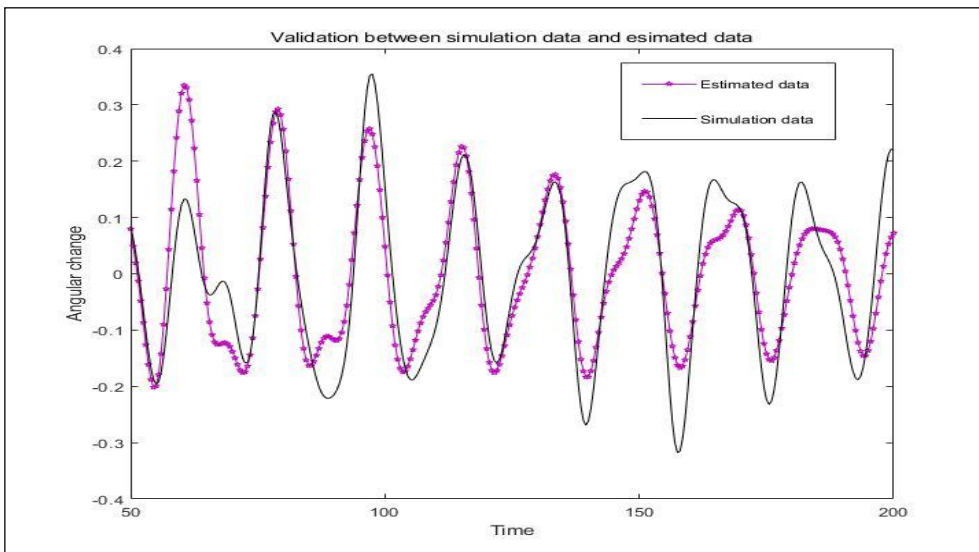


Fig. 34 Verification between measured and simulated output(Low order state space)

Table 11 Result of experimental

Item	High order state space	Low order state space
Percental of estimation	79.5 %	50.0 %
Stability	stable	unstable
Unit response feature	long term response	short term response
Convergency	converged	converged

제 4 장 결 론

본 연구에서는 선체 시스템을 선형-시불변 시스템으로 가정한 선체의 운동전달모델을 구축하였다. 시스템 구성에 필요한 입·출력 신호는 단일입력-단일출력 신호로서 컴퓨터 기반의 시뮬레이션을 통해 임의의 해상 파를 모델선박으로 선정한 153,000 m³급의 LNG 선박에 입사하여 롤(roll) 운동 데이터를 확보하였다. 시뮬레이션에는 전산유체역학 프로그램 ‘ANSYS CFX 17.2’를 이용하였고, 이 프로그램에 이용한 실험데이터는 선형개발 프로그램인 ‘델프트쉽(Delft-Ship marine software)’을 이용하여 생성하였다.

다음으로는 확보한 해양 파와 롤 운동 값을 이용하여 선체 시스템의 운동 전달특성을 추정하였다. 최종적으로 시뮬레이션에서 얻은 롤 운동 데이터와 추정한 결과를 비교하여 유의성을 검증하였다.

본 연구의 결과는 다음과 같다.

첫째, 선체의 운동전달특성을 해석할 수 있는 모델을 제안하였다.

둘째, 시스템의 전달함수를 수치적으로 해석하고 추정하였다. 극-영점 해석을 통한 전달함수 추정 결과, 단위원 내에 99.97%의 극 영점이 존재하기 때문에 추정한 전달함수가 안정함을 확인하였다.

셋째, 이를 시스템에 적용하여 수치적으로 유의성을 검증하였다. 선체운동 시뮬레이션을 통해 획득한 롤 운동 값과 추정한 전달함수를 이용해 산출한 롤 운동 값을 비교 검증한 결과 79.5%의 유의성을 획득하였다. 그래서 제안한 모델의 유용성을 확인하였다.

넷째, 상태 변수의 차원에 따라 모델의 정밀도가 변함을 확인하였다. 그래서 모델 설계에서는 상태 변수의 선정이 중요함을 알았다.

선체운동의 특성을 추정하는 것은 항해 안전에 중요한 요소이다. 전달함수를 이용하면 선체운동의 특성을 파악하는데 용이할 것으로 기대된다. 본 연구에서는 임의의 해양 파 환경 하에서 획득한 선체의 롤 운동 값을 이용하여

단일입력-단일출력 조건하의 선형-시 불변 시스템을 이용한 전달함수 추정에 그치고 말았다. 향후 다양한 조건의 해양 파 환경 하에서 6자유도 운동이 다중출력되는 다중입력-다중출력 조건하의 시스템 전달함수의 추정에 관한 연구를 향후의 과제로 남기고자 한다.

참고문헌

- [1] 구중도, 2007. 선체와 해양구조물의 운동학. 2판, 연경문화사
- [2] 김성중, 2018. 핵심이 보이는 제어공학 개정판. 한빛 아카데미
- [3] 김용균, 2016. 시스템 식별법을 이용한 스파 플랫폼 계류라인의 구조안전성 진단 및 예지. 석사학위논문. 인천:인하대학교
- [4] 대한조선학회 선박유체역학연구회, 2009. 선박의 저항과 추진, 지성사.
- [5] 반일환, 2015. 시스템 식별법을 이용한 해양 구조물의 계류 장력 시계열 예측에 관한 연구. 석사학위논문. 인천:인하대학교
- [6] 송명재, 조효제, 김진안, & 이승건. 1993, 다방향파의 수치시뮬레이션 및 통계적 검토. 한국해양공학회지, 7(2), 114-120.
- [7] 이승건, 2018. 선박운동조종입문. 수정 2쇄, GS 인터비전.
- [8] 이태일, 2003. 시스템식별법을 이용한 선박 조종성능 추정에 관한 실험적 연구. 박사학위논문. 부산:부산대학교
- [9] 이희범, 2009. 파랑 중 선박의 6자유도 운동 해석을 위한 전산유체역학 기법 연구. 박사학위논문. 서울:서울대학교
- [10] 임영택, 2010. CFX 모델을 이용한 반응조의 유동장 해석. 석사학위논문. 대전:배재대학교
- [11] 허재경 et al, 2012. 파랑 중 선박의 6자유도 운동해석을 위한 중첩격자 기반의 수치해법. 한국전산유체공학회 학술대회논문집, 74-77.
- [12] 한국원자력연구원, 2007. 상용 CFD 코드의 이상유동 모델 및 수치해법 개요, 대전:한국원자력연구원 열수력 안전 연구센터
- [13] ANSYS Inc. , 2009. ANSYS training manual, United States:SAS IP

- [14] Delftship, 2019. Delftship marine software. [Online], Available at: <http://www.delftship.net>, [Accessed at 18th Feb. 2019].
- [15] Favoreel, W., De Moor, B., & Van Overschee, 2000. Subspace state space system identification for industrial processes. *Journal of process control*, 10(2-3), 149-155.
- [16] HHIC, 2009. Final Trim, Stability & Longitudinal Strength Calculation. HHIC
- [17] HHIC, 2009. General Arrangement. HHIC
- [18] Hiromichi Akimoto et al, 2012. 파랑중 KCS 선형의 2자유도 운동에 관한 CFD 시뮬레이션. *한국해양환경 · 에너지학회 학술대회논문집*, 1446-1449.
- [19] Kim, B.-N. et al, 2009. The Comparison of Flow Simulation Results around a KLNG Model Ship, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*. The Society of Naval Architects of Korea, 46(3), pp. 219-231. doi: 10.3744/snak.2009.46.3.219.
- [20] Kongsberg Maritime., 2016. Hydrodynamic Modeling Tool Ship Database Manager Wizards and Verifications, Norway:Kongsberg Maritime
- [21] L. Ljung, 1987. *System Identification—Theory for the User*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ
- [22] Mathworks Inc., 2015. *System identification toolbox user guide 9.2*, United States:MATLAB and Simulink
- [23] Van Overschee, P., & De Moor, B. L., 2012. *Subspace identification for linear systems: Theory—Implementation—Applications*. Springer Science & Business Media.

부록 A - 해양 파 수식 전개

$$\eta(x, t) = A \cos(kx - \omega t) = A \cos \Theta \quad (1)$$

x : 파도의 진행방향

t : 시간

A : 파의 진폭(Amplitude)

k : 파수(Wave number)

ω : 원진동수

Θ : 위상함수

λ : 파장

식(1)에서 파수 와 파장, 각진동수 및 위상함수를 아래의 식(2)부터 식(4)와 같이 유도할 수 있다.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (3)$$

$$\Theta = kx - \omega t = k\left(x - \frac{\omega}{k}t\right) = k\left(x - \frac{\lambda}{T}t\right) = k(x - ct) \quad (4)$$

T : 파의 주기

c : 위상속도

파를 식(1)과 같이 표기하기 위해 유동장을 라플라스 방정식(5)를 만족하는 비점성-비압축성 이상유체 포텐셜 유동으로 가정한다. 또한 포텐셜 유동에서 속도벡터(\vec{V})는 $\vec{V} = \nabla \phi$ 로, 연속방정식은 $\nabla \cdot \vec{V} = 0$ 으로 정의한다.

$$\nabla \cdot \vec{V} = \nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (5)$$

\vec{V} : 속도벡터

∇ : 벡터연산자

수심이 무한한 경우 유동장의 경계는 수표면과 $y \rightarrow -\infty$ 로 정의된다. 비정상 유동에 대한 베르누이 방정식에서 비선형항을 무한하게 작다고 가정하여 이를 소거하고 정수면($y=0$)에 선형화하면 동력학적 자유표면 경계조건 식(6)이 산출된다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta = 0|_{y=0} \quad (6)$$

η : 수표면

g : 중력가속도

ϕ : 변위

또한 식(1)에 grad를 취해 법선을 취하고 이를 정수면($y=0$)에 선형화하여 운동학적 자유표면 경계조건을 식(7)과 같이 산출한다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0|_{y=0} \quad (7)$$

식(6)과 식(7)에서 η 를 소거해 식(8)과 같이 선형 자유표면 경계조건을 정의하고, 식(6)에 식(2)를 수심 경계면의 속도 벡터는 무한하게 작아진다는 조건과 연속방정식을 만족하는 조건하에 이항하여 식(9)와 같이 속도 포텐셜을 정의한다(대한조선학회 선박유체역학연구회, 2009).

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0|_{y=0} \quad (8)$$

$$\phi(x, y, t) = \left(\frac{gA}{\omega}\right) e^{ky} \sin(kx - \omega t) \quad (9)$$

식(9) 와 같이 정의된 속도포텐셜을 식(8)에 대입하여 파의 분산성을 정의하는 분산관계식 $w^2 = gk$ 를 산출한다. 수심이 유한한 경우 속도포텐셜과 수심의 종속성이 변환되므로 속도포텐셜과 분산관계식은 각각 식(10), 식(11) 과 같다.

$$\phi(x, y, t) = \left(\frac{gA}{\omega}\right) \frac{\cosh k(y+h)}{\cosh kh} \sin(kx - \omega t) \quad (10)$$

$$w^2 = gk \tanh kh \quad (11)$$

이때 식(10)에 구배연산자 grad를 적용하면 유체입자의 속도벡터 u, v 는 각각 식(12), 식(13) 과 같다.

$$u = \omega A \frac{\cosh k(y+h)}{\sinh kh} \sin(\omega t - kx) \quad (12)$$

$$v = \omega A \frac{\sinh k(y+h)}{\sinh kh} \cos(\omega t - kx) \quad (13)$$

부록 B - 횡요 방정식과 유체 지배 방정식

횡복원 모멘트(C_{44})는 $W \times \overline{GM}$ 이고, 파랑 강제 모멘트는 Froude-Krylov의 모멘트와 산란파 모멘트의 합이다. 유효 파경사 계수(θ_w)와 최대파경사(a_0)의 관계 식(1), 식(2)를 도입하여 근사적으로 파랑 강제 모멘트를 계산하면 식(3)과 같다(이승건, 2018).

$$\theta_w = a_0 e^{i\omega t} \quad (1)$$

$$a_0 = \frac{2\pi A}{\lambda} \quad (2)$$

$$F_4 = W \times \overline{GM} \times \Upsilon \theta_w \quad (3)$$

θ_w : 파경사

a_0 : 최대파경사

Υ : 유효파경사 계수

W : 선체의 질량

운동방정식을 다시 전개하여 계산하면 식(4), 식(5)와 같다(대한조선학회 선박유체역학연구회, 2009).

$$F_4 = \ddot{\phi} + \frac{N_{44}}{(I_{44} + J_{44})} \dot{\phi} + \frac{W \times \overline{GM}}{(I_{44} + J_{44})} \phi = \frac{W \times \overline{GM}}{(I_{44} + J_{44})} \times a_0 e^{i\omega t} \quad (4)$$

$$\phi = C_1 e^{-at} e^{\sqrt{\alpha^2 - \omega_n^2} t} + C_2 e^{-at} e^{-\sqrt{\alpha^2 - \omega_n^2} t} + \frac{\omega_n^2 \Upsilon a_0}{\omega_n^2 - \omega^2 + 2\alpha\omega i} e^{i\omega t} \quad (5)$$

식(5)의 우변의 첫 번째 항, 두 번째 항은 항에 포함된 지수함수의 특성 상 제어상수(α)가 0보다 클 때 0으로 수렴하므로 세 번째 항만 남기면 횡동요의 변위(ϕ)는 식(6)과 같다.

$$\phi = \frac{\omega_n^2 \Upsilon a_0}{\omega_n^2 - \omega^2 + 2\alpha\omega i} e^{i\omega t} = \mu \Upsilon a_0 e^{i(\omega t + c)} \quad (6)$$

μ : 배율

$$\omega_n : \sqrt{\frac{C_{44}}{I_{44} + J_{44}}}$$

θ_w : 파경사

a_0 : 최대파경사

Υ : 유효파경사 계수

x축을 회전축으로하는 관성모멘트는 식(7) 과 같이 정의한다(Kongsberg Maritime. , 2016).

$$I_{xx} = \frac{1}{12} \times m (B^2 + 4 \overline{GZ}^2) \quad (7)$$

I_{xx} : 관성모멘트

B : 선체 횡방향 길이

\overline{GZ} : 복원정

본 연구에서는 선체운동을 전산유체역학(CFD)를 이용하여 시뮬레이션 하였으므로 유체를 지배하는 방정식을 전개하였다. 유체의 지배방정식은 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식이 있다. 유체의 연속방정식은 보존된 물리량의 수송방정식으로부터 유도되며 질량보존의 법칙을 정의하는 방정식이다. 3차원 비정상유동의 연속방정식은 식(8), 식(9) 와 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (9)$$

ρ : 유체의 밀도, t : 시간

u, v, w : x 축, y 축, z 축 방향의 속도벡터

∇ : 구배연산자, \vec{V} : 속도벡터

Navier - Stokes 방정식은 뉴턴의 제 2법칙을 유체에 적용하여 유체에 작용하는 힘의 변화와 운동량의 보존에 관하여 기술하는 편미분 방정식이다. 유체는 고정된 형태가 없는 상으로서 고정된 좌표계 상 관측이 난해한 특성을 가지고 있다. Navier-Stokes 방정식은 식(10) 과 같다.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \mu \nabla^2 u \quad (10)$$

난류유동은 불규칙, 임의성, 강한 확산특성을 가진다. 난류 유동장을 해석하기 위한 방법은 LES(Large Eddy Simulation)법, Navier-Stokes 해석법 및 직접수치시뮬레이션방법의 3가지로 나뉜다(임영택, 2010). 그중 Navier-Stokes 해석법은 방정식 상의 레이놀즈 응력을 해석하기 위해 난류모델을 사용한다. 상용코드에서는 2-방정식 모델인 $k-\epsilon$ 난류모델과 SST 난류모델이 많이 사용되고 있다. 3차원 공간에서 속도성분에 의한 난류운동에너지는 식(11) 과 같고, 레이놀즈 응력은 식(12) 와 같다(임영택, 2010).

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'^2 + v'^2 + w'^2} \quad (11)$$

k : 난류운동에너지

u, v, w : x,y,z 축방향의 속도벡터

$$\tau = -\mu_t (\nabla \cdot \vec{V}_m + \nabla \cdot \vec{V}_m) \quad (12)$$

τ : 레이놀즈 응력

μ_t : 난류점성계수(m^2/s)

난류모델에 적용된 난류점성계수는 식(13) 과 같다.

$$\mu_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 w, SF_2)} \quad (13)$$

k_e : 난류유동에너지

μ_t : 난류점성계수(m^2/s)

C_μ : 비례상수

ε : 난류 소멸률

$k-\epsilon$ 모델은 일부 불구속된 유동이나 회전유동에서 강건성이 낮은 단점이 있어 1993년 Menter에 의해 $k-\epsilon$ 모델과 $k-\omega$ 모델의 장점을 이용해 이를 보완하는 SST(Shear Stress Transport) 모델이 제안되었다(임영택, 2010). 선체주위는 기체-유체가 공존하는 다상유동 (Multiphase flow)형태를 보이고 있다. 다상유동을 모델링하는 방법은 액체의 상을 연속체로 간주하여 시간평균의 Navier-Stokes 방정식으로 해석하고 액체 내의 분산된 상은 입자법으로 개별 추적하는 Euler-Lagrange법, 각각의 상을 상호침투 가능한 연속체로 간주, 상의 체적율을 시공간에 대한 연속함수로 표현하며 전체 상의 체적율의 합은 항상 1로 간주하는 Euler-Euler법이 있다. 전자의 경우 비산되는 유체, 연료의 연소, 입자가 포함된 유체의 유동에 적합하며 후자의 경우 성층유동 및 자유표면 유동에 적합한 특성을 가지고 있다. 또한 VOF 모델은 고정된 Euler 격자계 에서 각 상의 경계면을 추적하는 방법으로 혼합되지 않는 성질을 가진 두가지 이상의 유체가 경계면을 가질 때 적용 가능하며 제트유동, 기포유동, Gas-Liquid 유동에 주로 적용된다(한국원자력연구원, 2007).

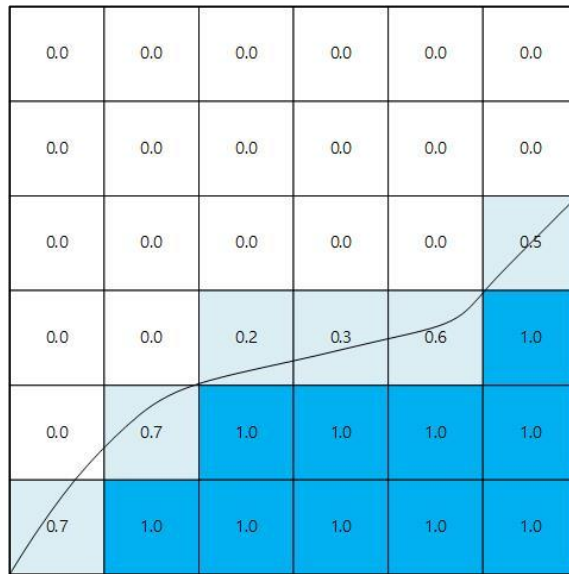


Fig. 35 Volume of Fluid model

부록 C - 선체운동 시뮬레이션 결과

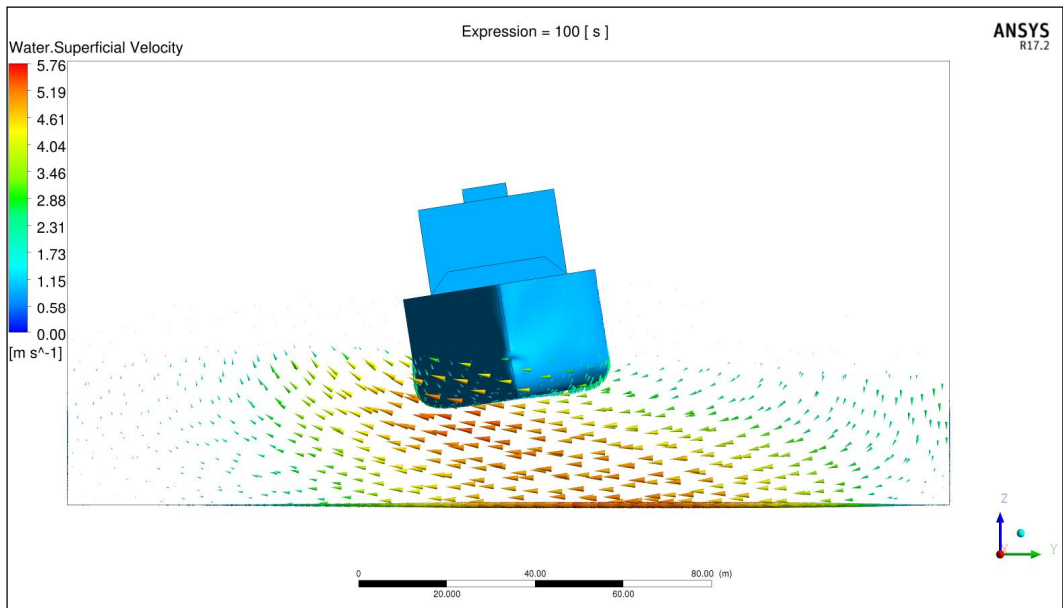


Fig. 36 Snap shot of Ship motion(100.0 sec)

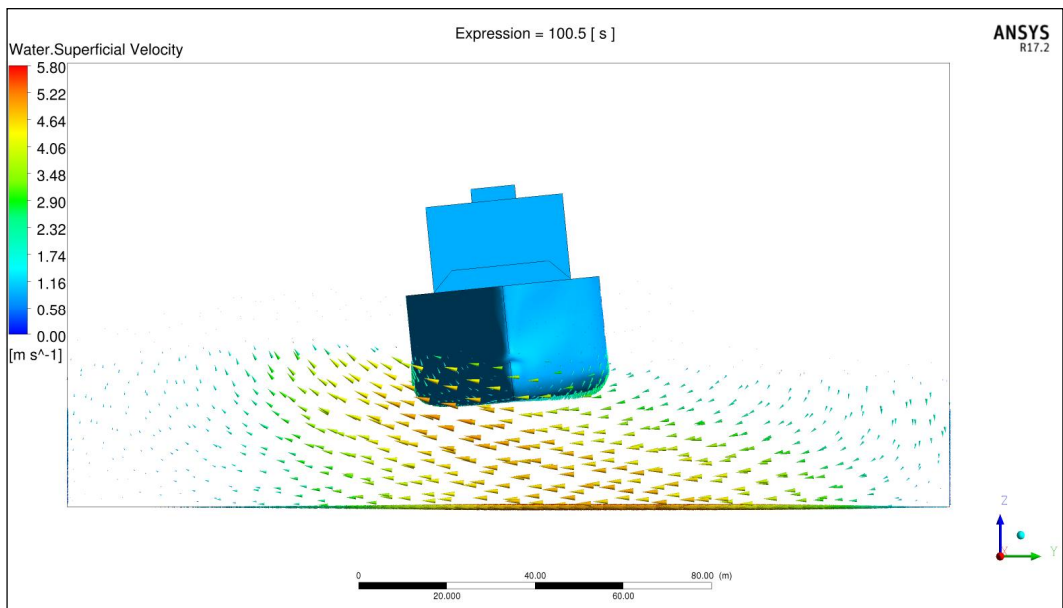


Fig. 37 Snap shot of Ship motion(100.5 sec)

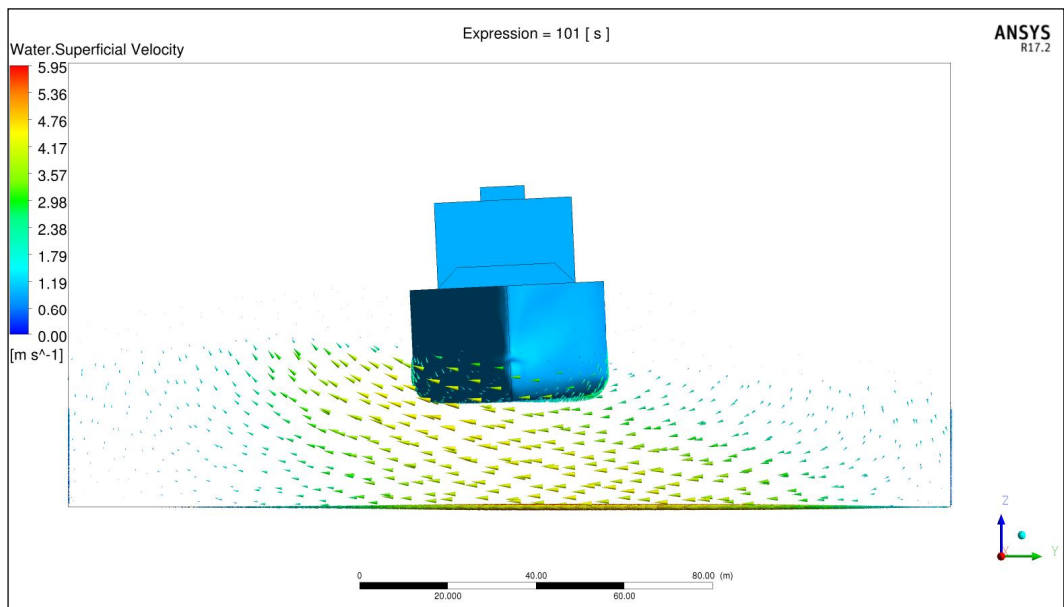


Fig. 38 Snap shot of Ship motion(101.0 sec)

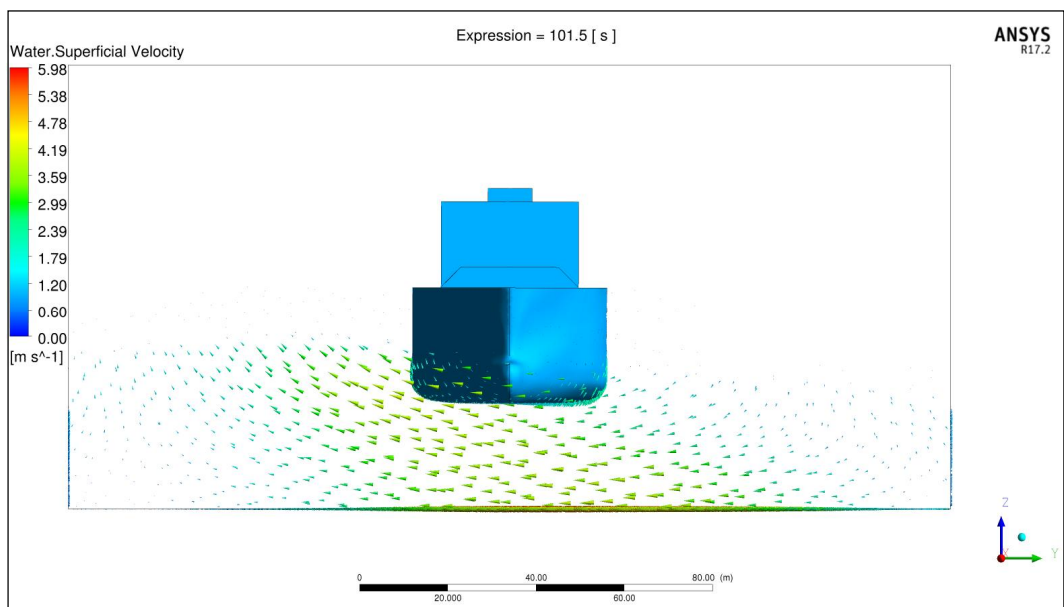


Fig. 39 Snap shot of Ship motion(101.5 sec)

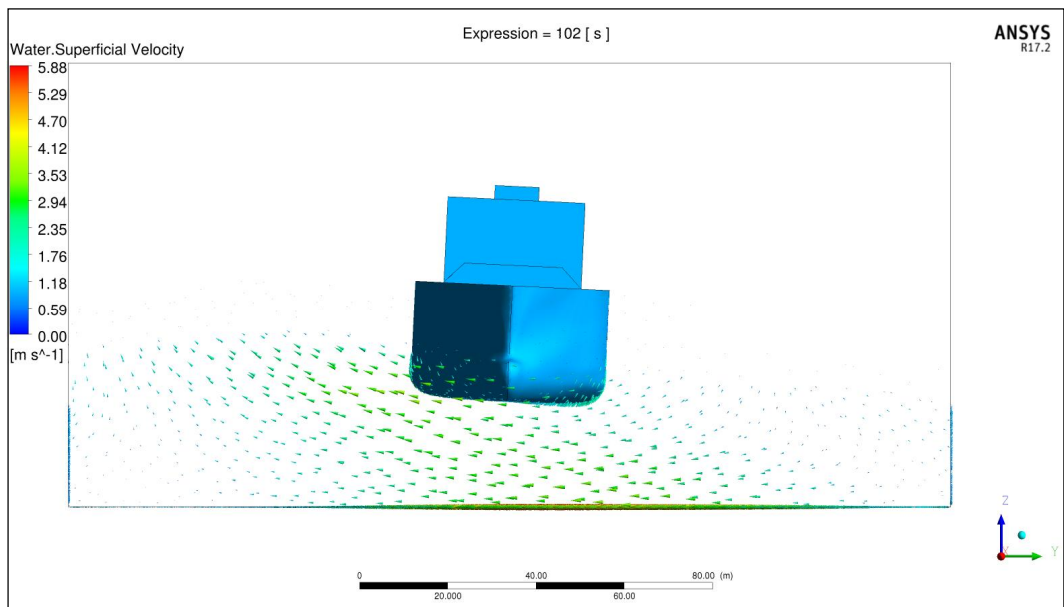


Fig. 40 Snap shot of Ship motion(102.0 sec)

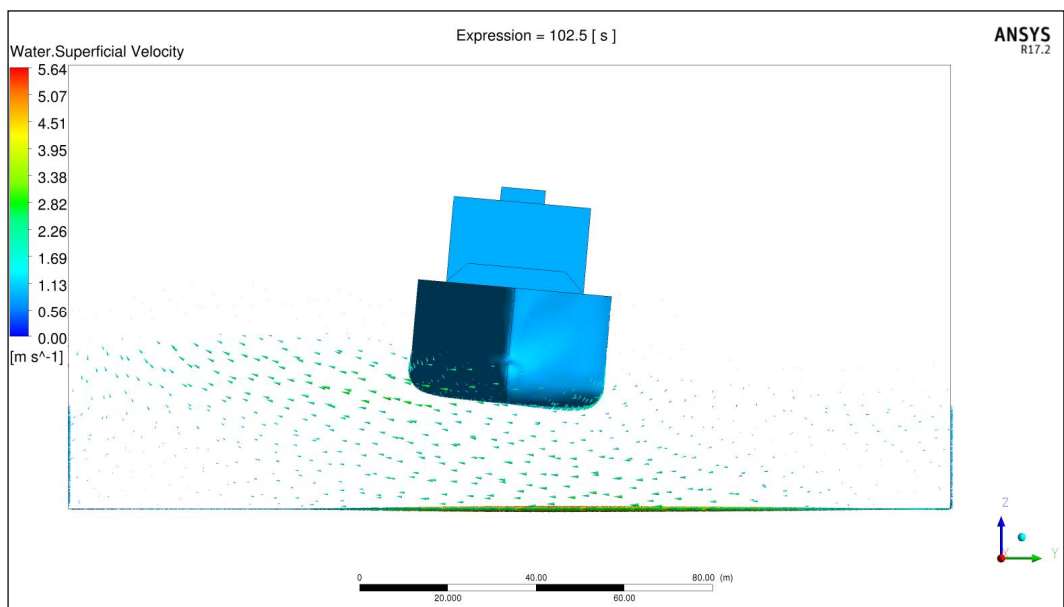


Fig. 41 Snap shot of Ship motion(102.5 sec)

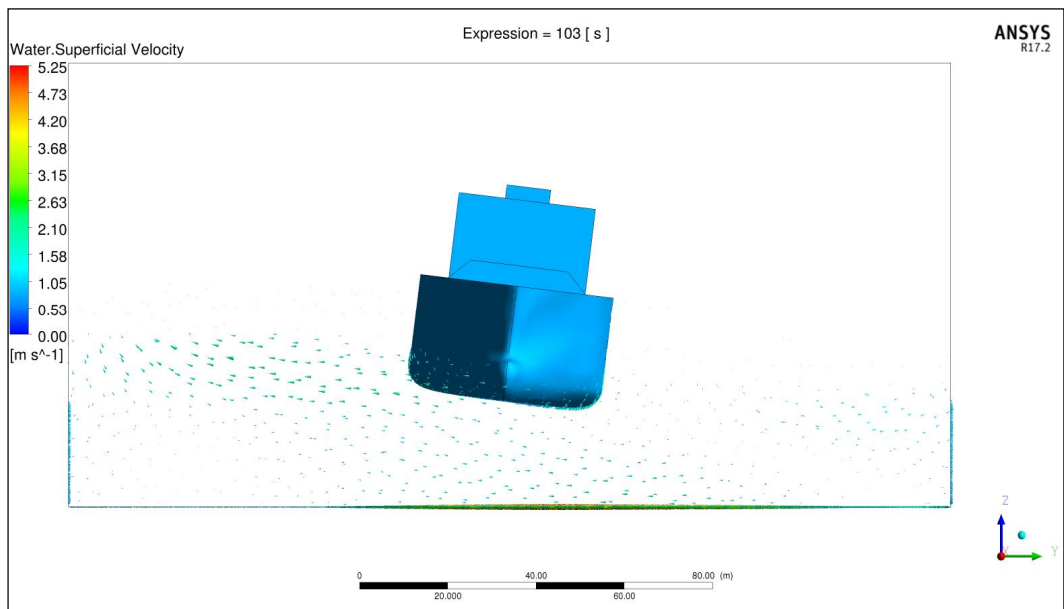


Fig. 42 Snap shot of Ship motion(103.0 sec)

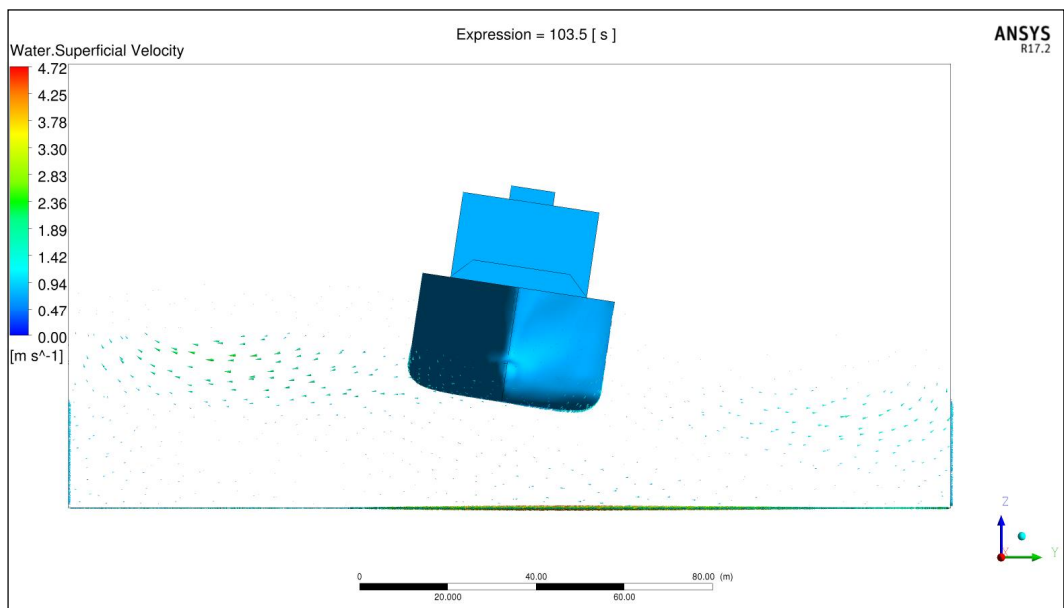


Fig. 43 Snap shot of Ship motion(103.5 sec)

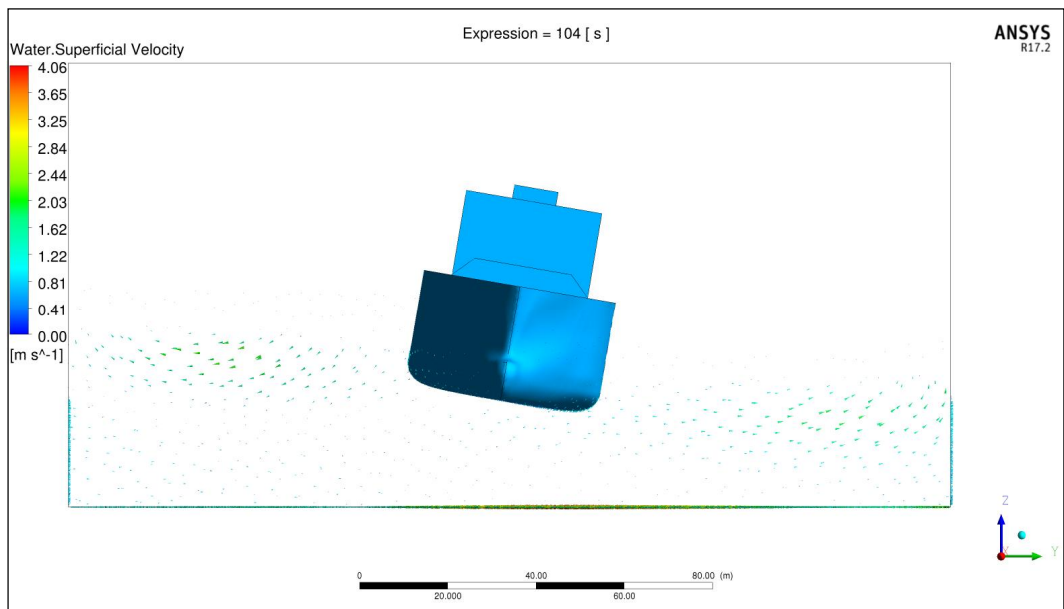


Fig. 44 Snap shot of Ship motion(104.0 sec)

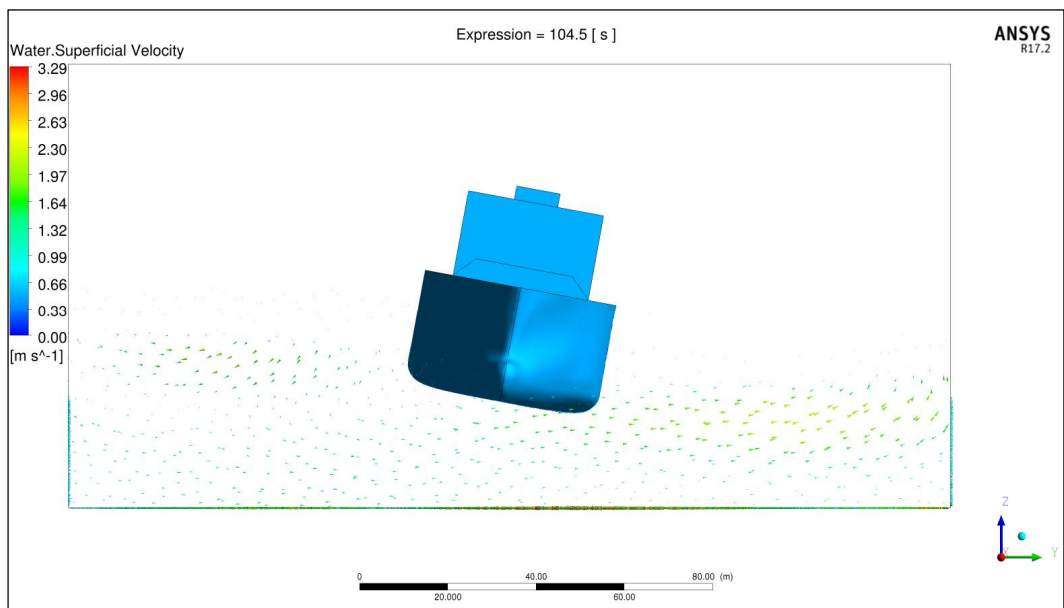


Fig. 45 Snap shot of Ship motion(104.5 sec)

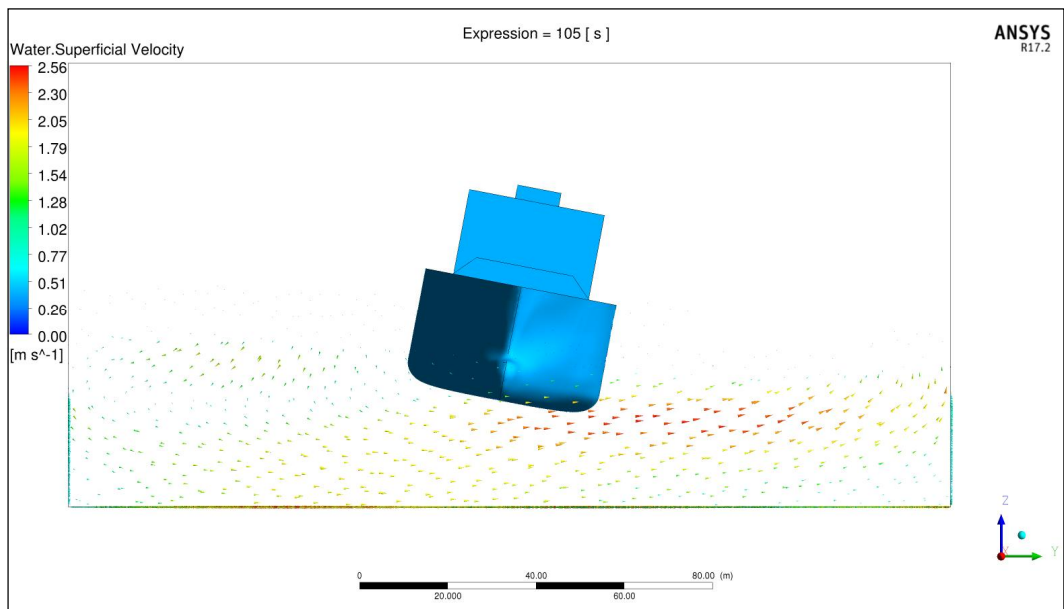


Fig. 46 Snap shot of Ship motion(105.0 sec)

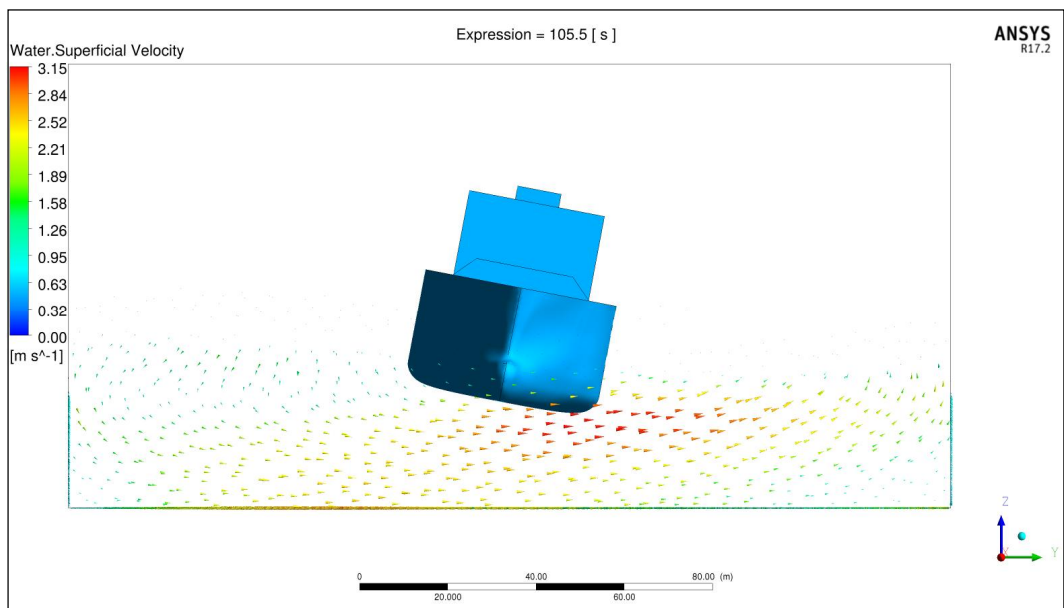


Fig. 47 Snap shot of Ship motion(105.5 sec)

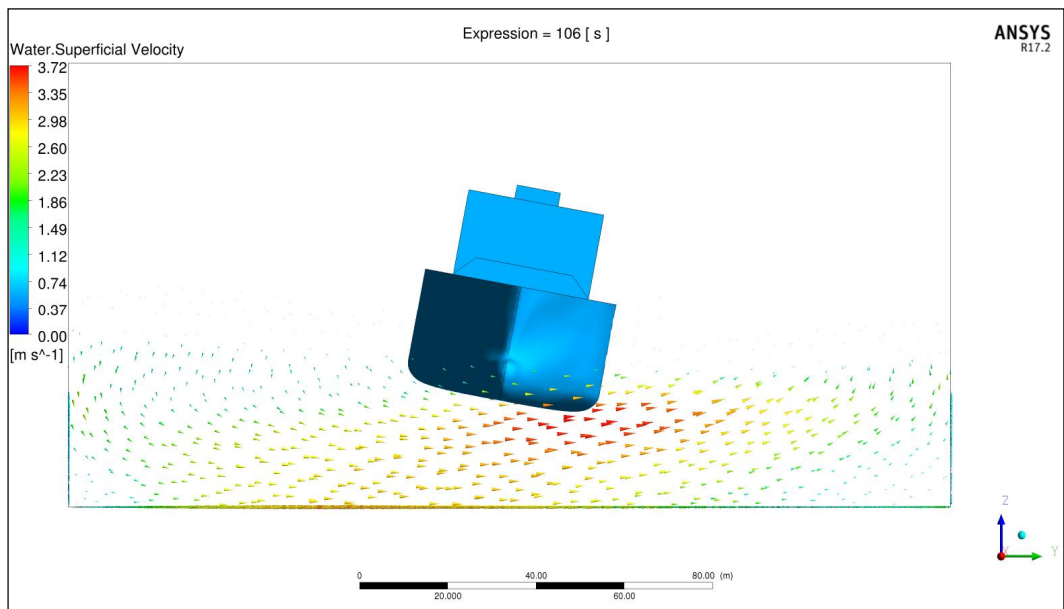


Fig. 48 Snap shot of Ship motion(106.0 sec)

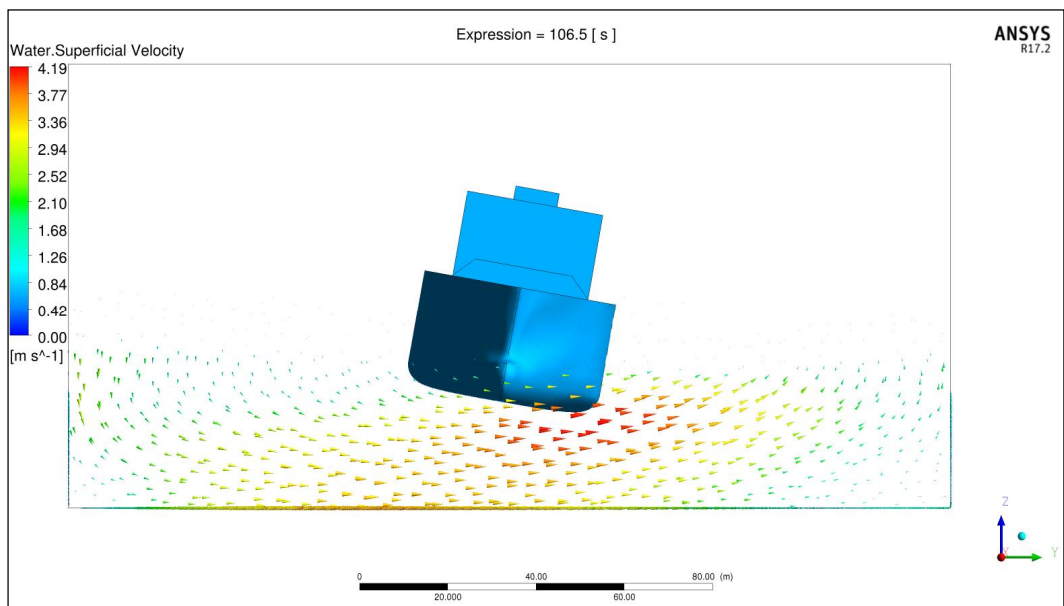


Fig. 49 Snap shot of Ship motion(106.5 sec)

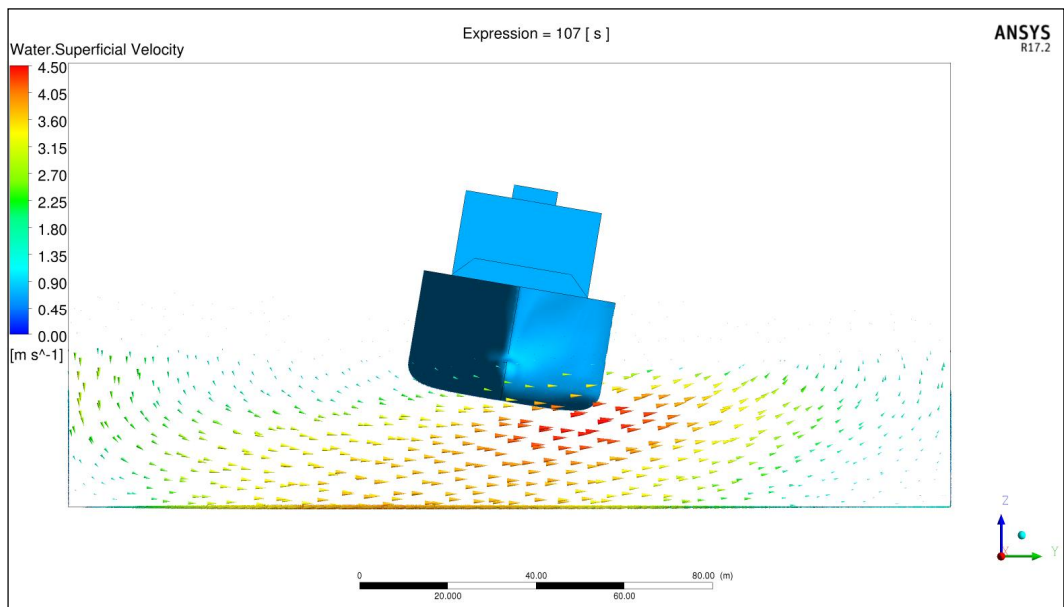


Fig. 50 Snap shot of Ship motion(107.0 sec)

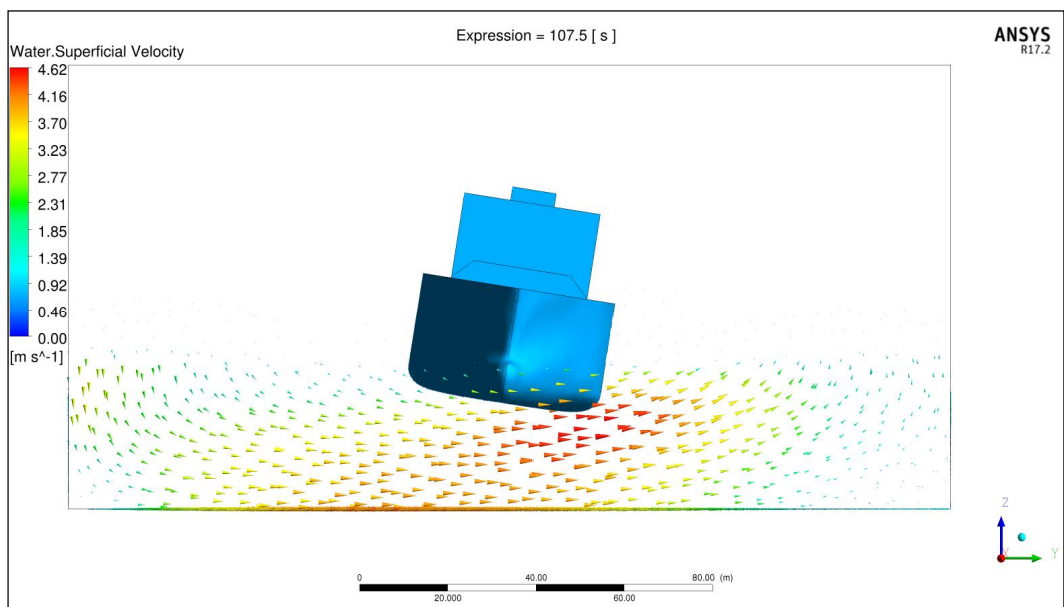


Fig. 51 Snap shot of Ship motion(107.5 sec)

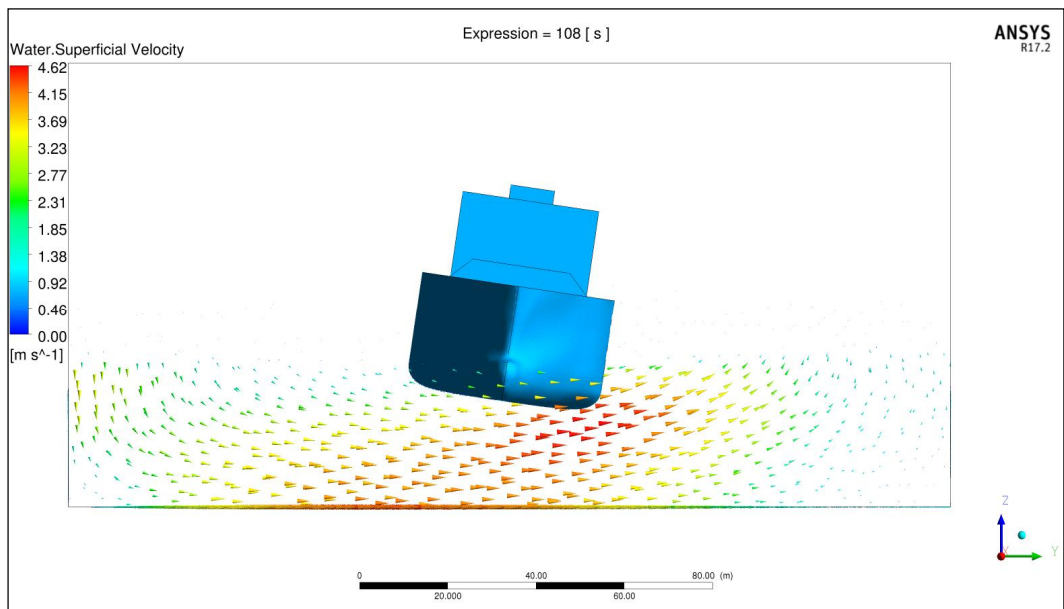


Fig. 52 Snap shot of Ship motion(108.0 sec)

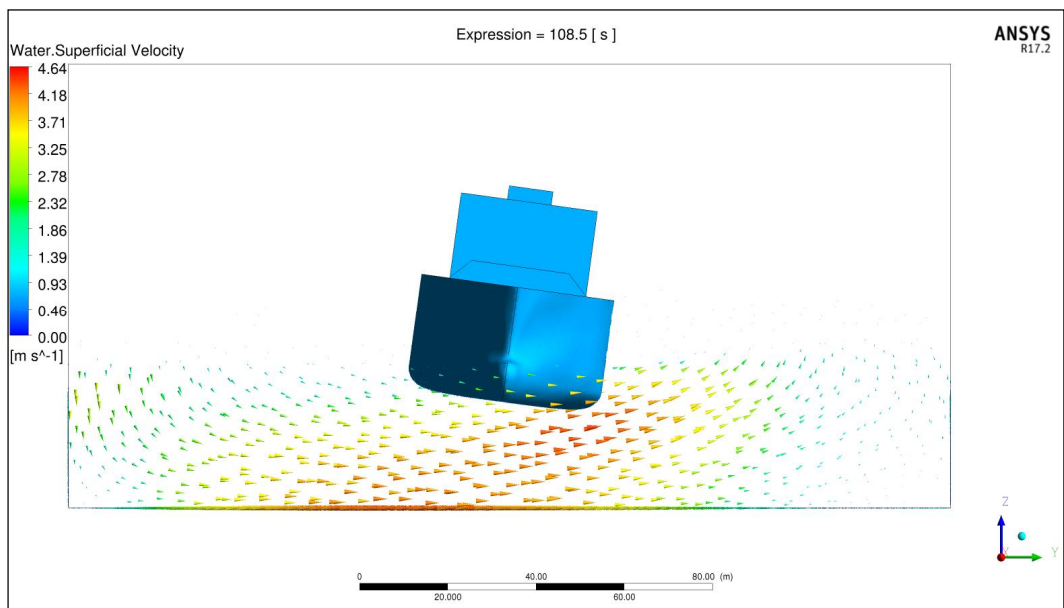


Fig. 53 Snap shot of Ship motion(108.5 sec)

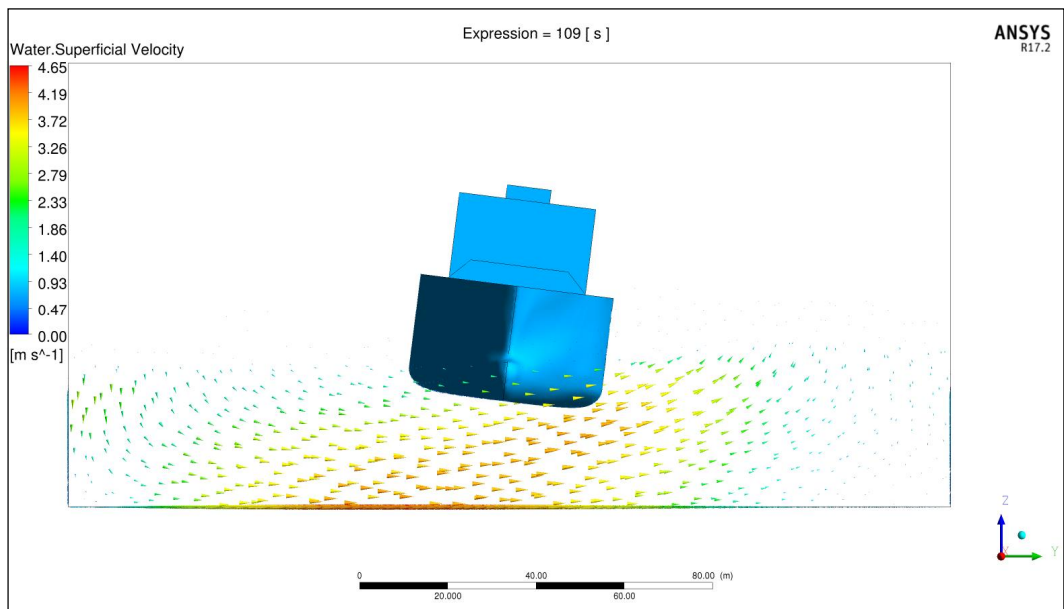


Fig. 54 Snap shot of Ship motion(109.0 sec)

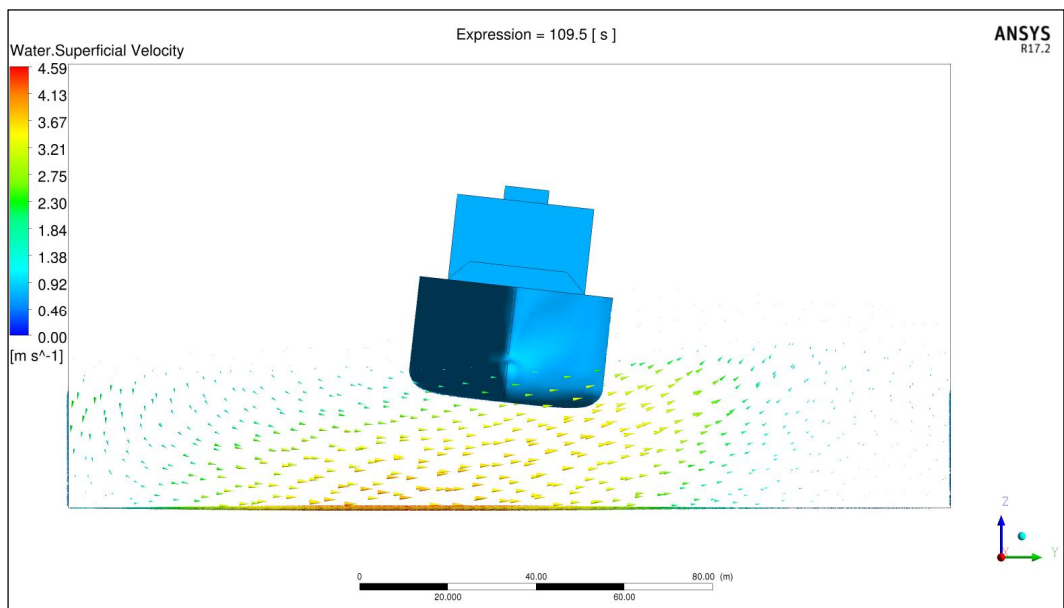


Fig. 55 Snap shot of Ship motion(109.5 sec)

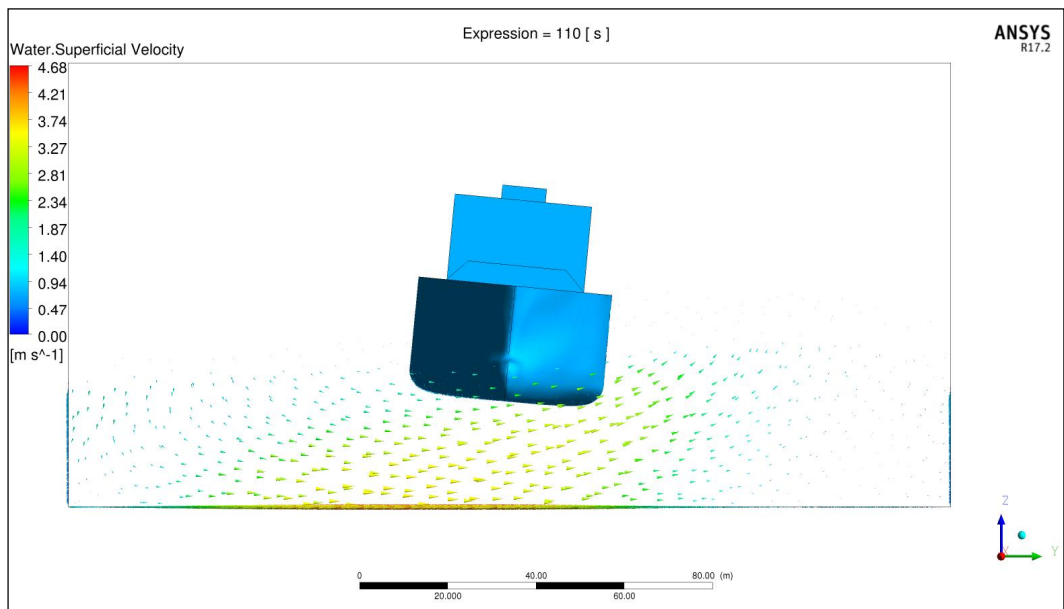


Fig. 56 Snap shot of Ship motion(110.0 sec)

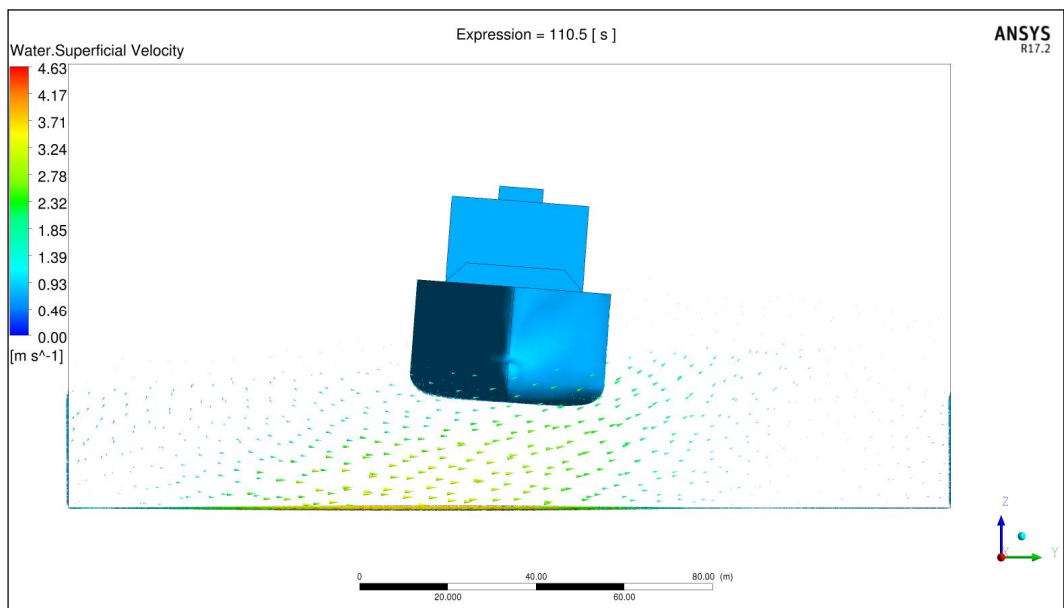


Fig. 57 Snap shot of Ship motion(110.5 sec)

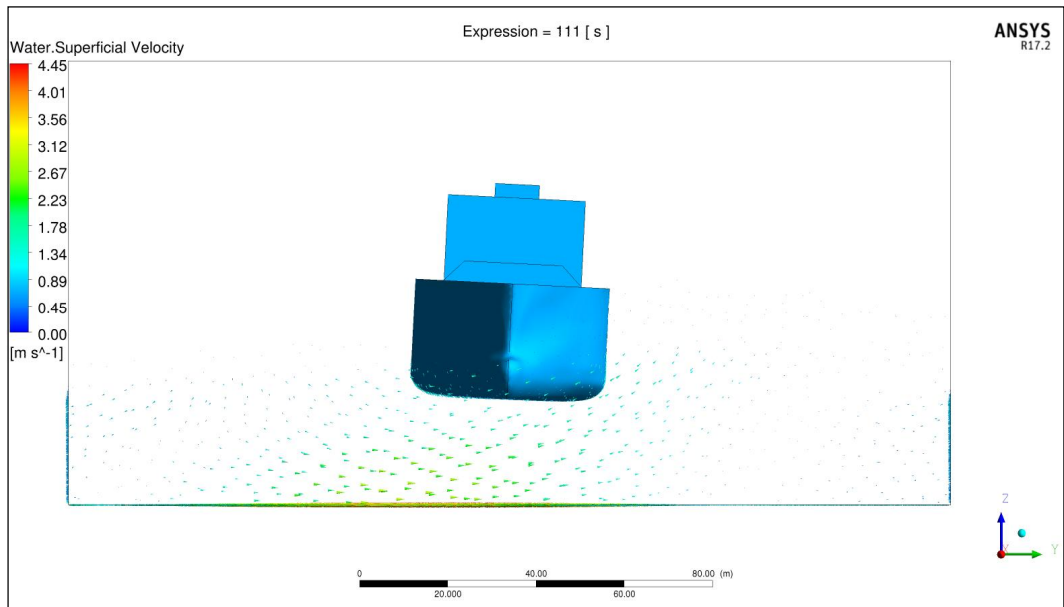


Fig. 58 Snap shot of Ship motion(111.0 sec)